

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**



**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ**  
**до виконання**  
**розрахунково-графічної роботи**  
**з дисципліни**

**«ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ТА МАГНІТНИХ КІЛ»**

*(для студентів усіх форм навчання спеціальності*  
*151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології)*

**Харків**  
**ХНУМГ ім. О. М. Бекетова**  
**2017**

Методичні рекомендації до виконання розрахунково-графічної роботи з дисципліни «Теорія електричних та магнітних кіл» (для студентів усіх форм навчання спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : Я. Б. Форкун, М. Л. Глебова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. – 45 с.

Автори: канд. техн. наук, доц. Я. Б. Форкун,  
канд. техн. наук, доц. М. Л. Глебова

Рецензент д-р техн. наук. проф. А. Г. Сосков

*Рекомендовано кафедрою альтернативної електроенергетики та електротехніки, протокол засідання № 2 від 22.09.2017.*

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 РОЗРАХУНОК СКЛАДНОГО КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.....	6
2 РОЗРАХУНОК РОЗГАЛУЖЕНОГО КОЛА СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ.....	21
3 РОЗРАХУНОК ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У ЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.....	35
4 РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ.....	41
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	44

## ВСТУП

Метою викладання навчальної дисципліни «Теорія електричних та магнітних кіл» для напрямку 6.050201 – Системна інженерія та спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітня програма «Системна інженерія», є опанування фундаментальними поняттями, теорією та методологією сучасної теоретичної електротехніки, формування наукового світогляду та електротехнічної культури студентів, безпосередньо пов'язаної з їх фахом.

Завдання дисципліни – підготовка висококваліфікованих спеціалістів, які знають фізичні процеси, що відбуваються в електричних та магнітних колах, вміють аналізувати, розраховувати, синтезувати та проектувати складні системи з використанням комп'ютерного обладнання.

Важливе значення відводиться закріпленню теоретичних відомостей лекційного курсу «Теорія електричних та магнітних кіл» на практичних заняттях та при виконанні розрахунково-графічних робіт, що сприяє підвищенню якості підготовки молодих спеціалістів.

Розрахунково-графічні роботи (далі РГР) – один з основних видів самостійної роботи студентів. Ці методичні вказівки складено відповідно до робочої програми дисципліни «Теорія електричних та магнітних кіл» з метою допомогти студентам напрямку підготовки 6.050201 – Системна інженерія та спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітня програма «Системна інженерія» у вивченні тем «Основні закони та методи аналізу лінійних електричних кіл постійного струму», «Властивості і методи розрахунку лінійних електричних кіл однофазного синусоїдного струму», «Перехідні процеси в лінійних електричних колах», «Електричні кола з розподіленими параметрами». РГР складається з 4х частин: розрахунок складного кола постійного струму (розділ 1), розрахунок розгалуженого кола синусоїдного струму (розділ 2), розрахунок перехідних процесів у нерозгалуженому колі постійного струму (розділ 3), розрахунок лінії з розподіленими параметрами (розділ 4). Для кращого засвоєння матеріалу розрахунково-графічних робіт наведено приклади розрахунку.

Слід зауважити, що значну частину часу виконання РГР займають обчислення, які повинні бути проведені з високою точністю для забезпечення правильності подальших побудов (потенціальних, векторно-топографічних діаграм, графіків). При цьому безперечно корисним є використання студентами сучасних програм, що широко застосовуються у всьому світі для проведення технічних розрахунків – MS Excel, MathCad Professional та інших.

РГР складається з трьох окремих частин, які мають назви:

- розрахунок складного кола постійного струму;
- розрахунок розгалуженого кола синусоїдного струму;
- розрахунок перехідних процесів у лінійних електричних колах постійного струму;
- розрахунок лінії з розподіленими параметрами.

Варіант роботи визначають за номером студента в журналі викладача, схема для розрахунку відповідає варіанту роботи (рис. 1.1–1.30 – розділ 1, рис. 2.1–2.30 – розділ 2, рис. 3.1, 3.2 – розділ 3), числові дані елементів схем визначають з таблиць 1.1, 2.1, 3.1, 4.1 відповідно для першої та другої частини вони є єдиними для всієї групи і визначаються за номером групи, для третьої та четвертої частин варіант визначається за номером студента в журналі викладача. Порядок вибору варіанта і вихідних даних для усіх частин також пояснюється в прикладах розрахунку цих частин.

Пояснювальна записка, наприклад, першої частини розрахунково-графічної роботи повинна містити (аналогічно і для інших частин):

- титульний аркуш першої частини розрахунково-графічної роботи;
- вихідну схему, вихідні дані та робоче завдання для першої частини РГР;
- розрахунок у послідовності відповідно до робочого завдання першої частини РГР

Електричні схеми необхідно виконувати згідно з вимогами державних стандартів із застосуванням креслярського приладдя; графіки, діаграми – на міліметрівці. Загальне оформлення пояснювальної записки – згідно з «ДСТУ 3008-95. Документація. Звіти у сфері науки й техніки».

Приклад оформлення титульного аркуша наведено нижче (для інших частин титульний аркуш відрізняється тільки назвою, узятою в лапки).

---

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА  
імені О. М. БЕКЕТОВА

КАФЕДРА *альтернативної електроенергетики та електротехніки*  
РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНА РОБОТА (ЧАСТИНА 1)

з дисципліни «Теорія електричних та магнітних кіл»  
**«Розрахунок складного кола постійного струму»**

Варіант № 5

Виконав:

студент гр. Сінж2015-1

Перевірила:

І. І. Іванов

доц. Я. Б. Форкун

Харків – 2018

---

# 1 РОЗРАХУНОК СКЛАДНОГО КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

## 1.1 Мета роботи

- вивчити методику комплексного дослідження електричного кола постійного струму;
- оволодіти методами розрахунку електричних кіл, а саме методом контурних струмів, вузлових потенціалів, еквівалентного генератора;
- навчитися складати баланс потужностей для кола, що містить джерела напруги і струму, і будувати потенціальну діаграму для замкнутого контура.

## 1.2 Підготовка до роботи

1.2.1 Накреслити схему кола відповідно до свого варіанта (рис.1.1–1.36). При цьому провести необхідні перетворення, а саме з'єднати точки кола з однаковими потенціалами (кінці кола, що з'єднані з корпусом), а також видалити вітки з вольтметрами (внутрішній опір вольтметрів приймають значно більшим, ніж опори схеми).

1.2.2 У схемі кола довільно обрати напрямки струмів у вітках.

1.2.3 Опрацювати теоретичний матеріал за темою роботи: [2] – с. 28–52; [3]– с. 9–59.

## 1.3 Робоче завдання до першої частини розрахунково-графічної роботи

1.3.1 Провести перетворення у схемі, що досліджується, джерела струму  $j$  на еквівалентне джерело ЕРС  $E_j$ . Подальший розрахунок проводити для схеми з еквівалентним джерелом ЕРС  $E_j$ .

1.3.2 Розрахувати всі струми методом контурних струмів.

1.3.3 Провести баланс потужностей.

1.3.4 Побудувати для зовнішнього контуру потенціальну діаграму.

1.3.5 Розрахувати у загальному вигляді струми методом вузлових потенціалів.

1.3.6 Розрахувати струм вітки з ЕРС  $E_2$  методом еквівалентного генератора.

1.3.7 Визначити показання вольтметрів.

Примітка. У рівнянні енергетичного балансу розходження між потужністю джерел енергії  $P_{\text{джерел}}$  і потужністю, що розсіюється в навантаженнях кола,  $P_{\text{нав.}}$ , не повинно перевищувати 5 %, а саме

$$\delta = \left| \frac{P_{\text{джерел}} - P_{\text{нав.}}}{P_{\text{джерел}}} \right| \cdot 100 \% \leq 5 \%$$

Під час виконання п. 1.3.2 (метод контурних струмів) використовують будь-який метод розв'язання систем лінійних алгебраїчних рівнянь.

Таблиця 1.1 – Вихідні дані для розрахунку

Позначення на схемах	Числові дані по групах		
	Номери груп		
	1	2	3
$R_1, \text{Ом}$	5	4	3
$R_2, \text{Ом}$	3	5	5
$R_3, \text{Ом}$	2	7	6
$R_4, \text{Ом}$	4	4	3
$R_5, \text{Ом}$	8	8	5
$R_6, \text{Ом}$	2	3	4
$R_7, \text{Ом}$	4	4	2
$R_8, \text{Ом}$	3	4	2
$E_1, \text{В}$	30	25	20
$E_2, \text{В}$	20	30	40
$E_3, \text{В}$	40	40	20
$E_4, \text{В}$	30	20	30
$E_5, \text{В}$	20	30	30
$E_6, \text{В}$	15	10	10
$j, \text{А}$	4		

Приклад розрахунку (пункт 1.3) наведений нижче.

### ВАРІАНТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМ

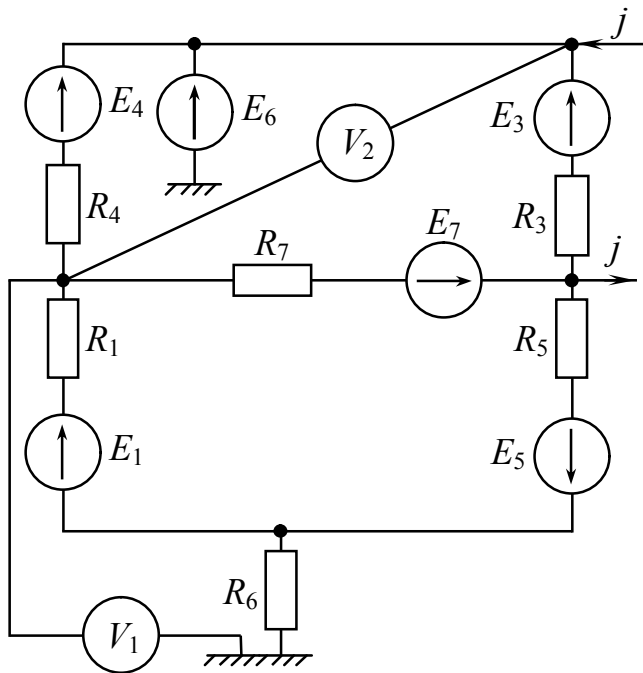


Рисунок 1.1

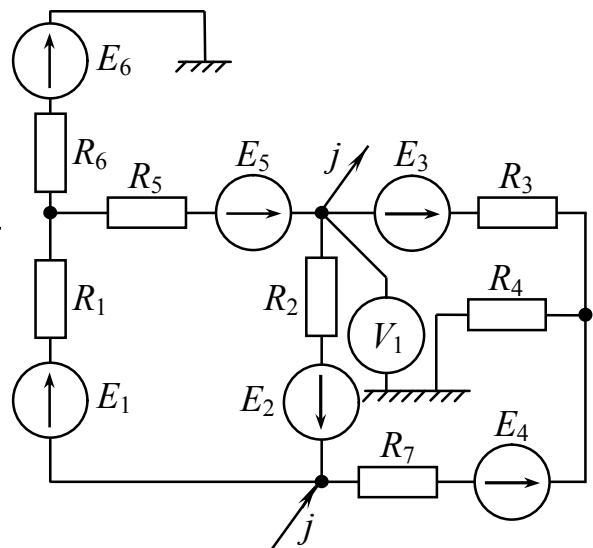


Рисунок 1.2

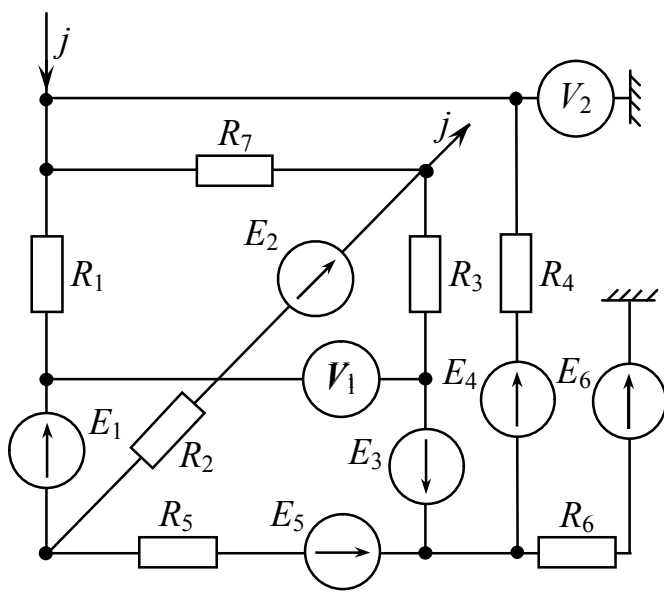


Рисунок 1.3

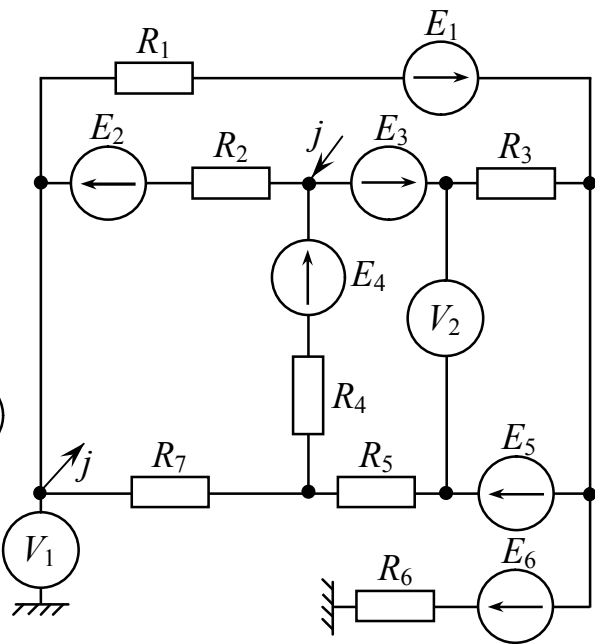


Рисунок 1.4

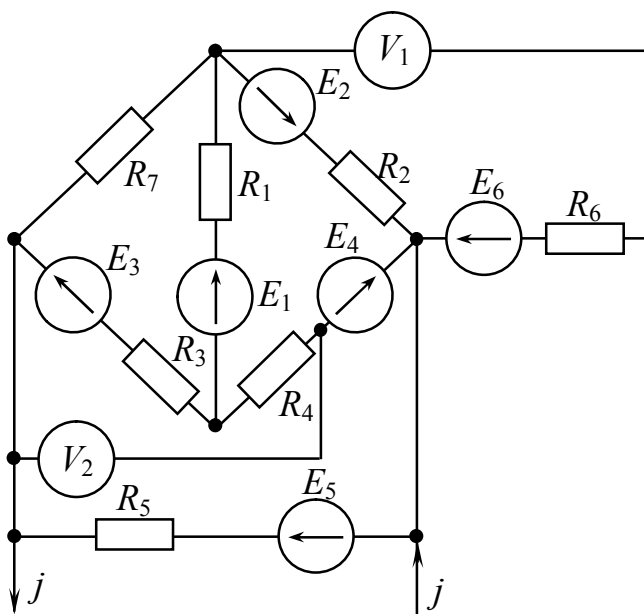


Рисунок 1.5

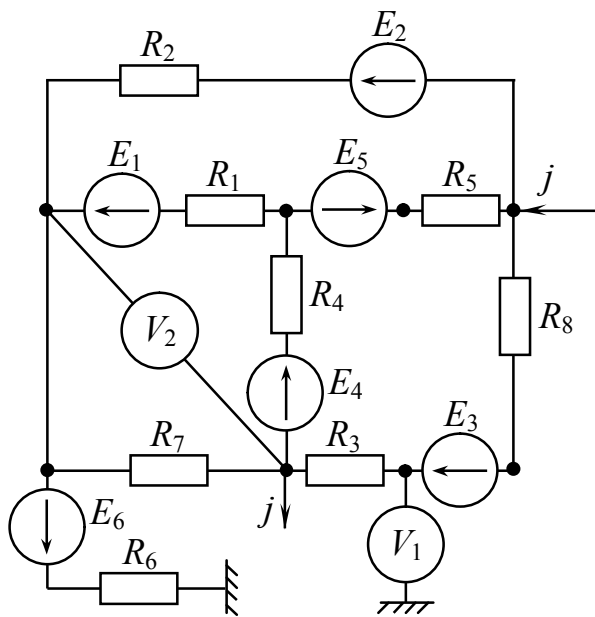


Рисунок 1.6



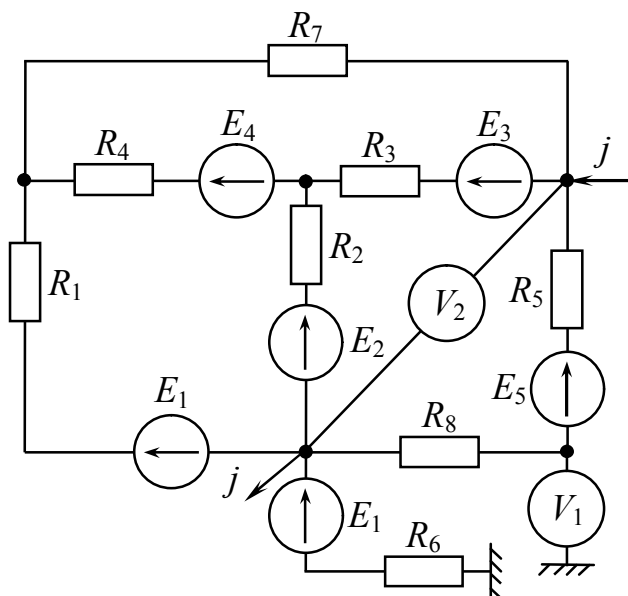


Рисунок 1.7

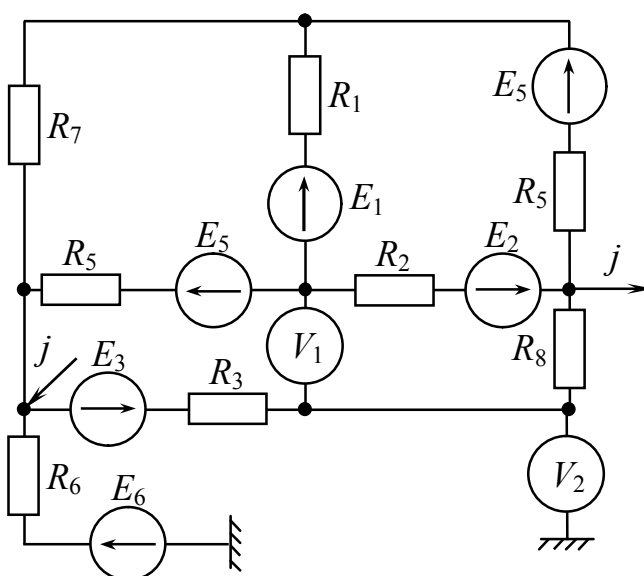


Рисунок 1.8

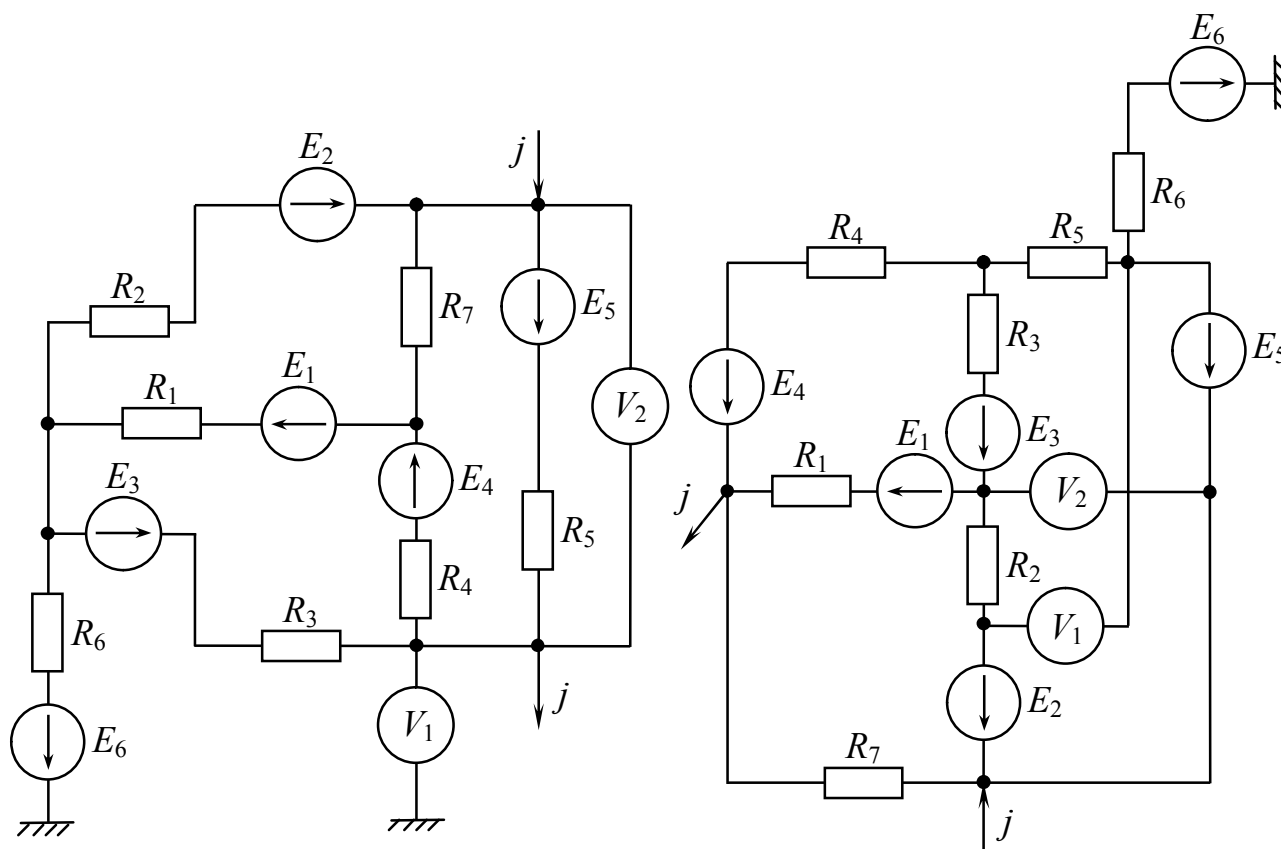


Рисунок 1.9

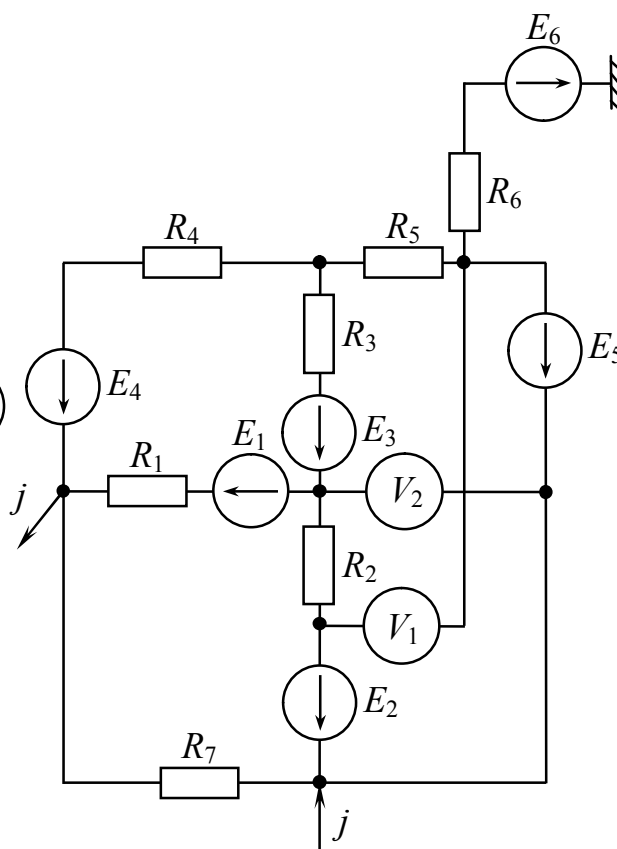


Рисунок 1.10

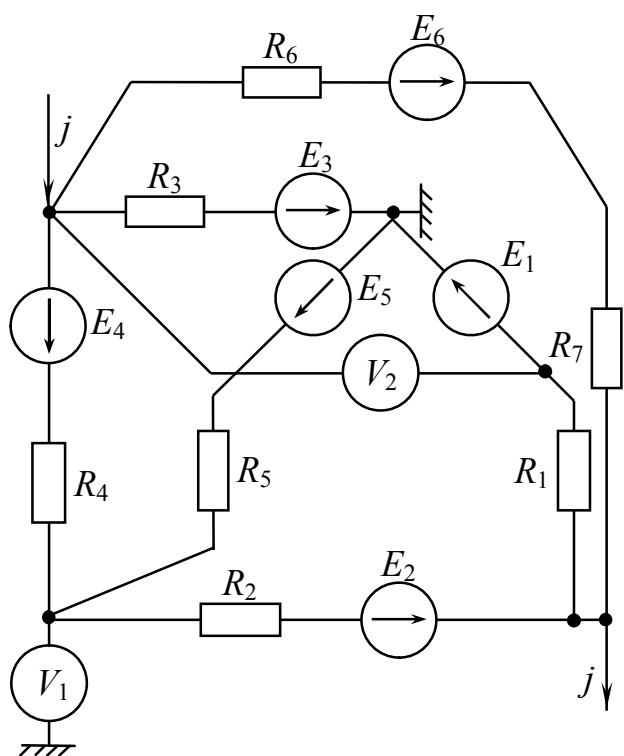


Рисунок 1.11

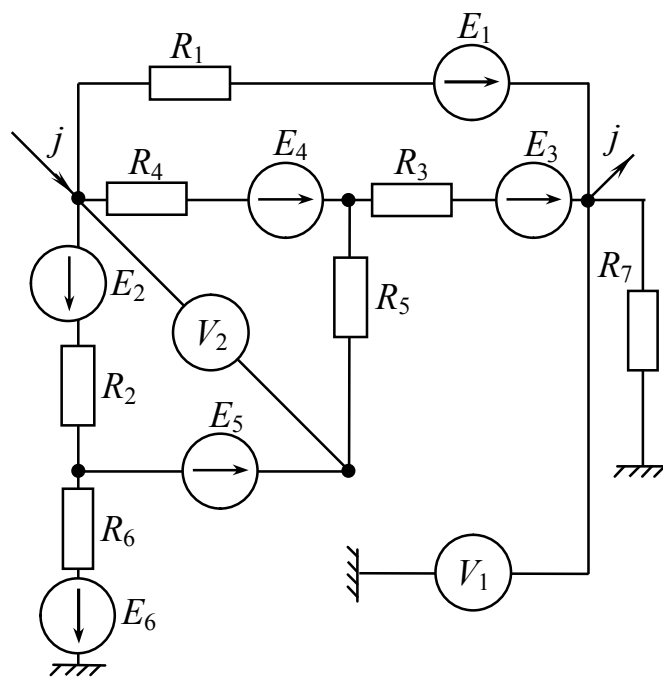


Рисунок 1.12

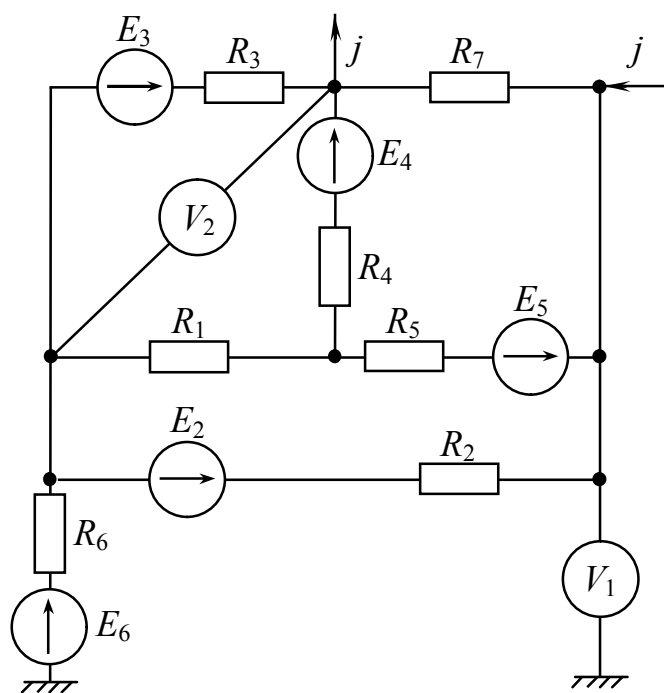


Рисунок 1.13

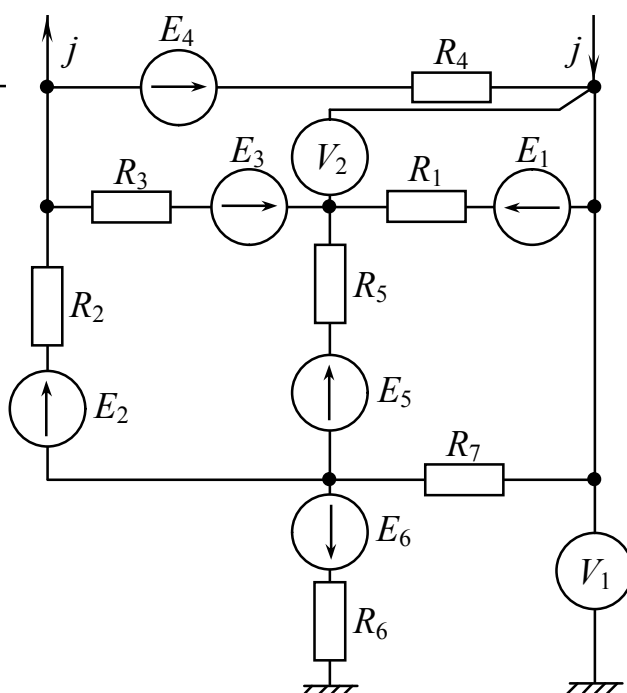


Рисунок 1.14

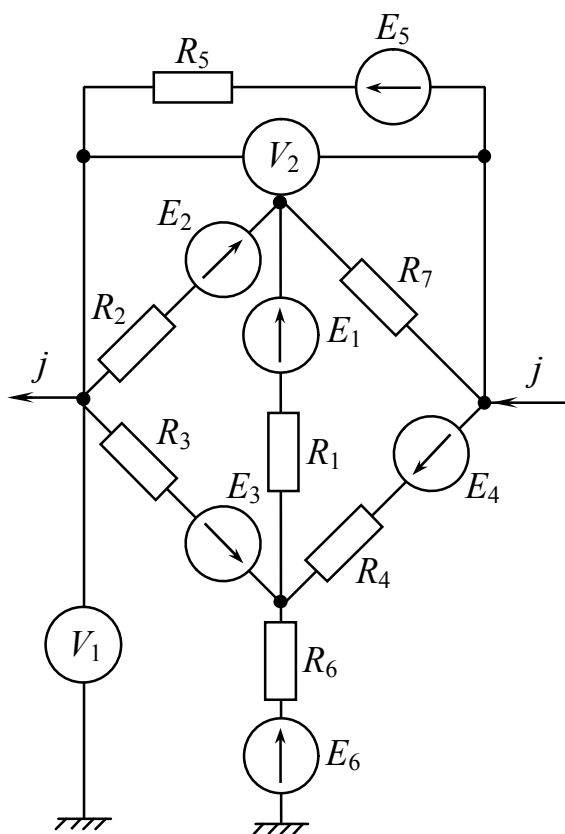


Рисунок 1.15

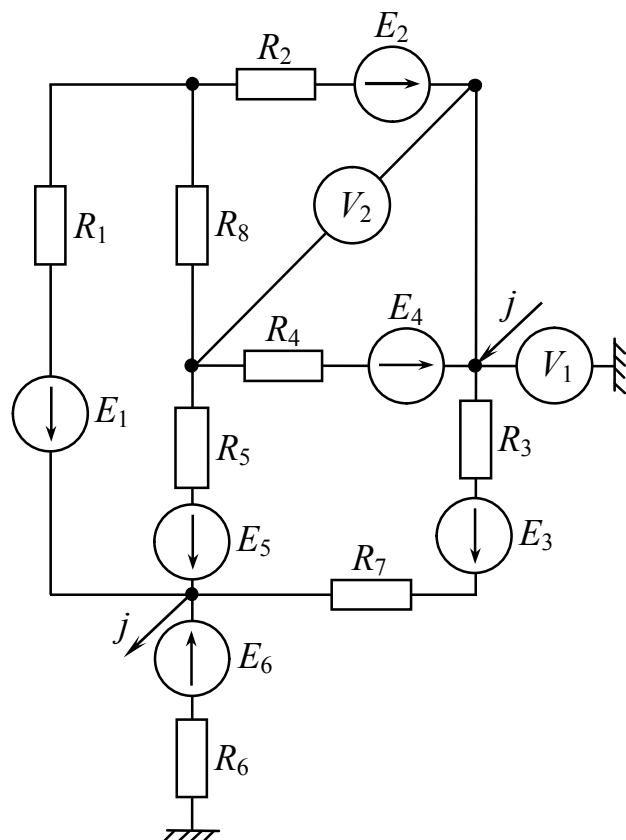


Рисунок 1.16

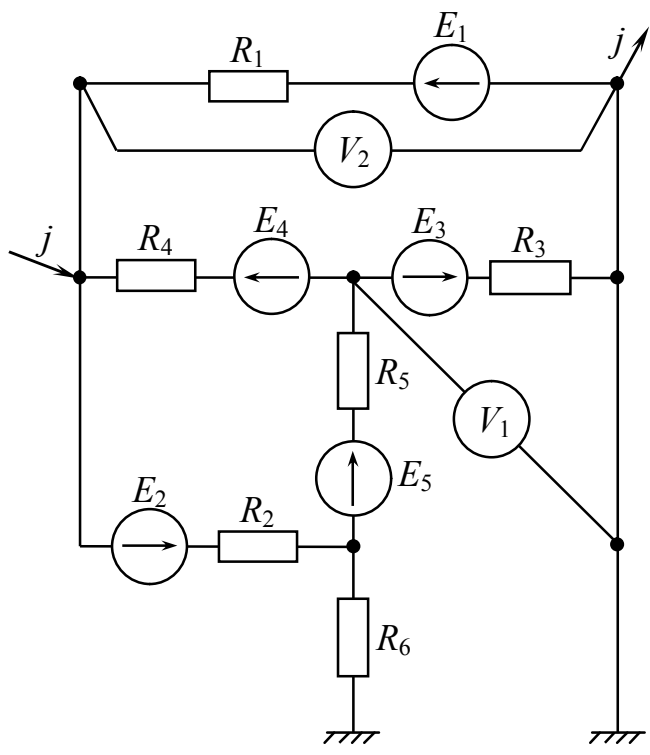


Рисунок 1.17

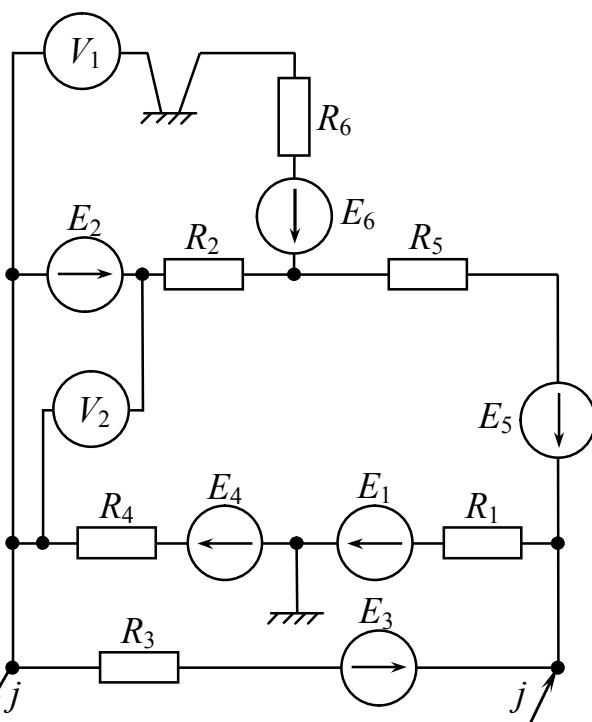


Рисунок 1.18

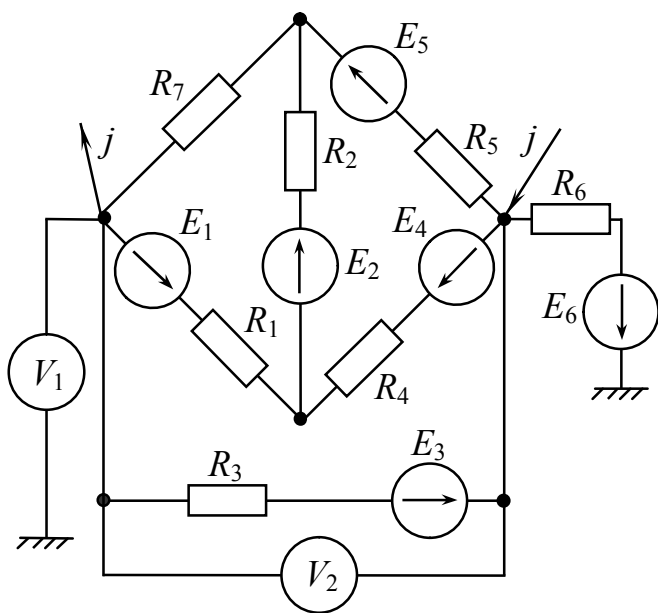


Рисунок 1.19

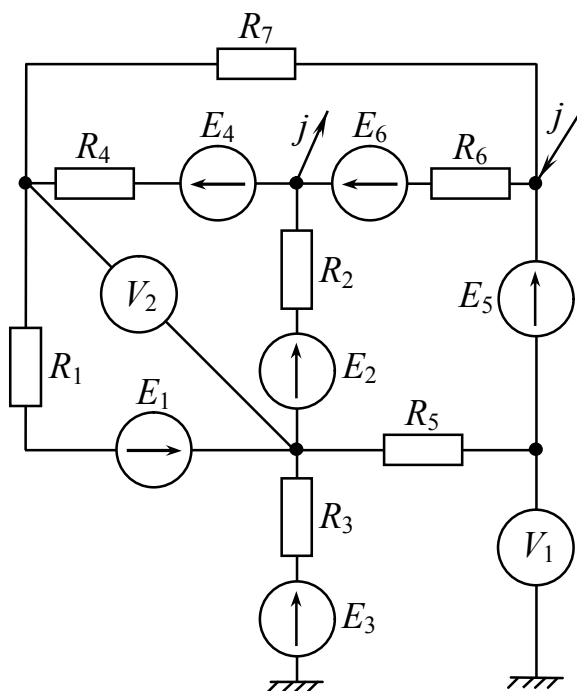


Рисунок 1.20

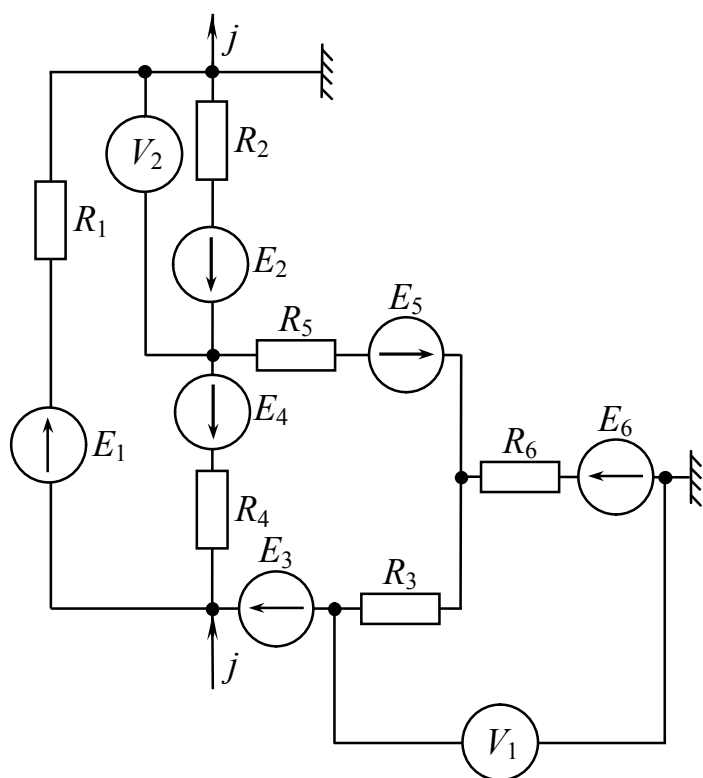


Рисунок 1.21

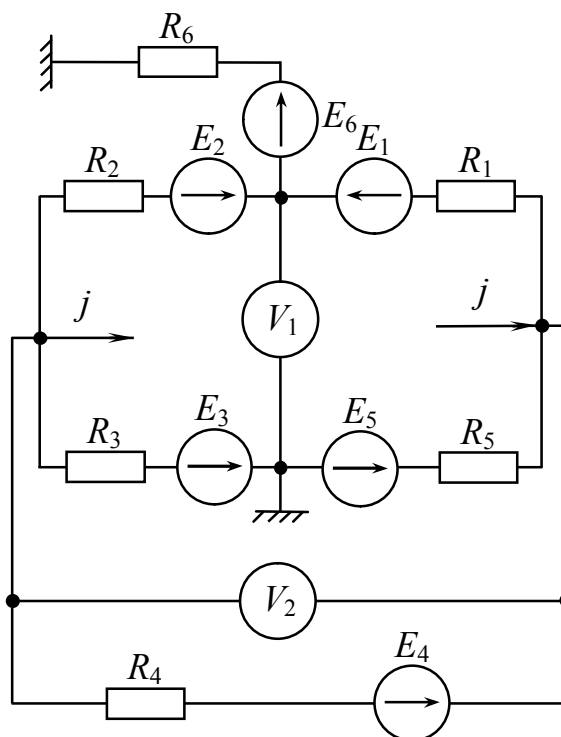
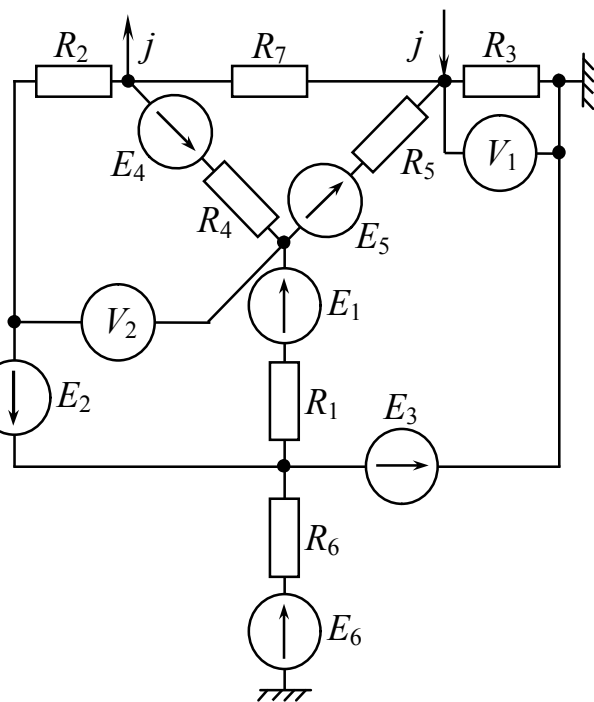
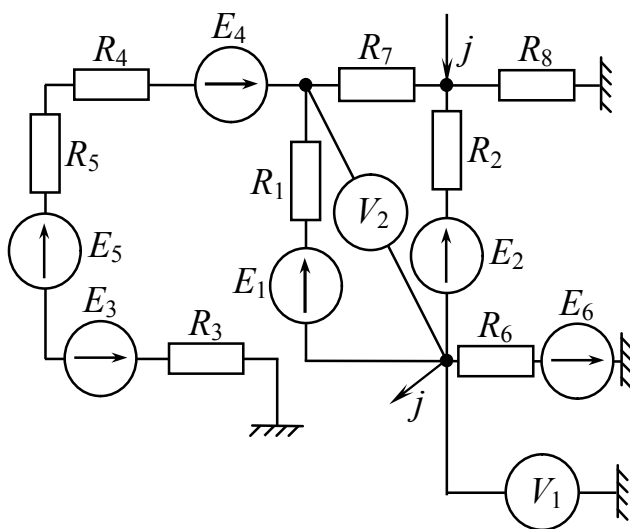
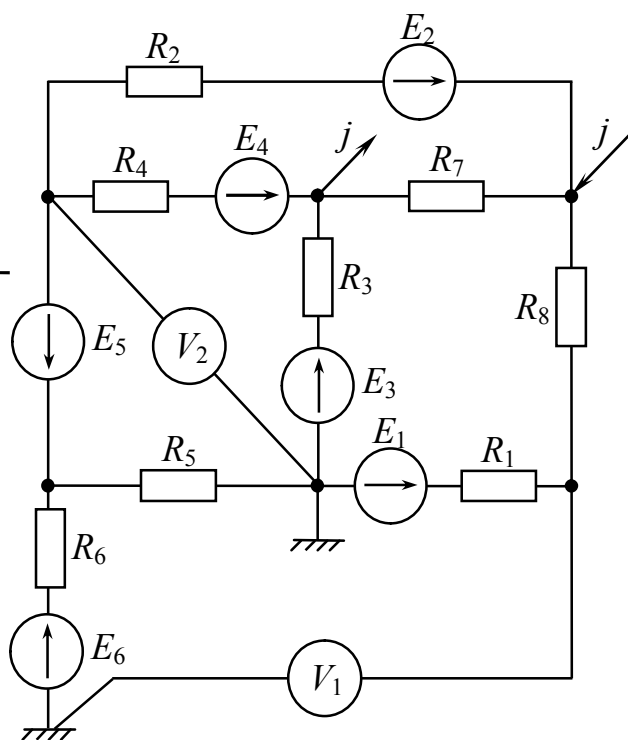
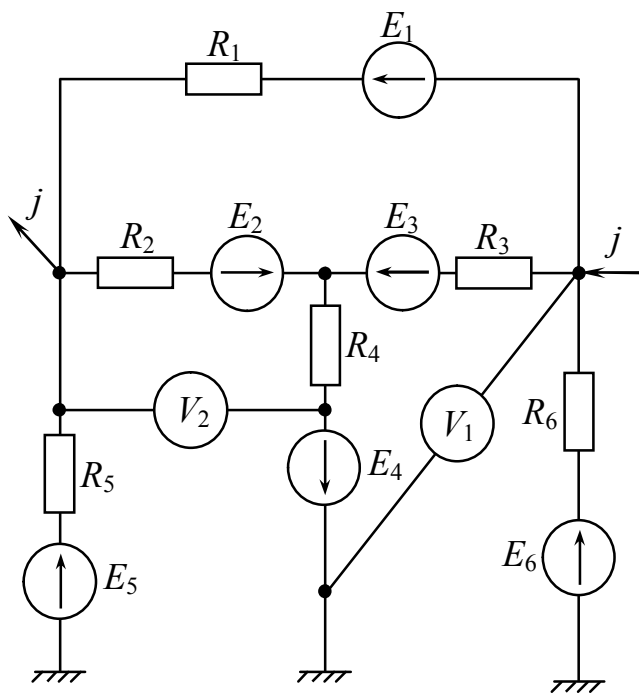


Рисунок 1.22



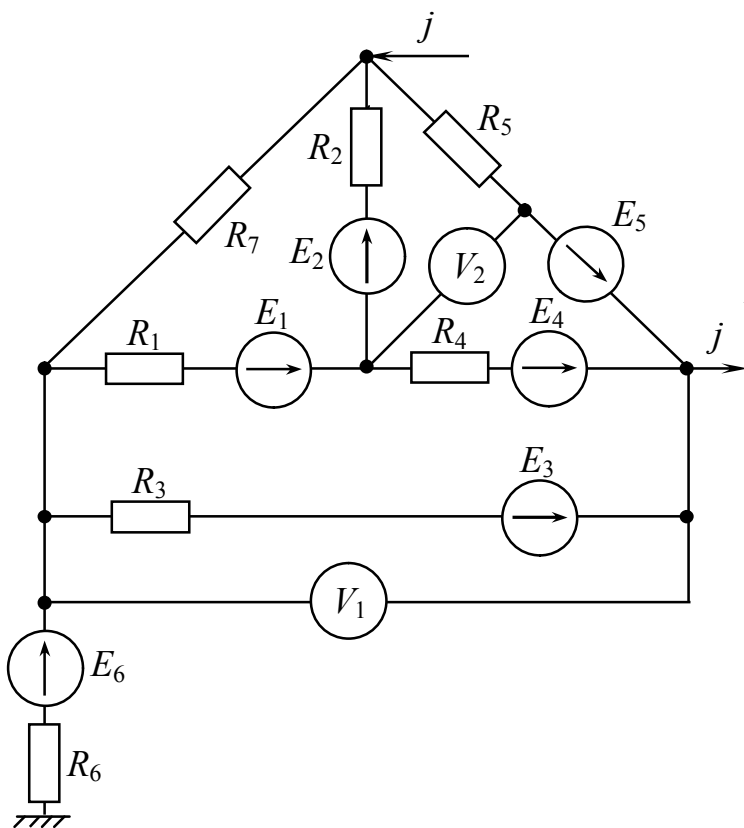


Рисунок 1.27

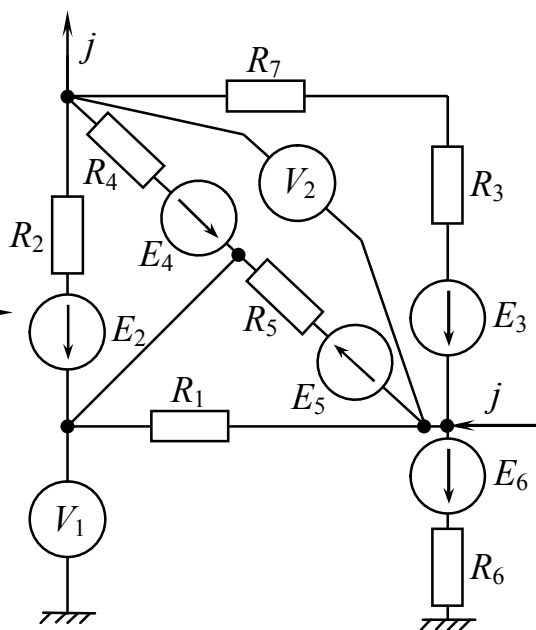


Рисунок 1.28

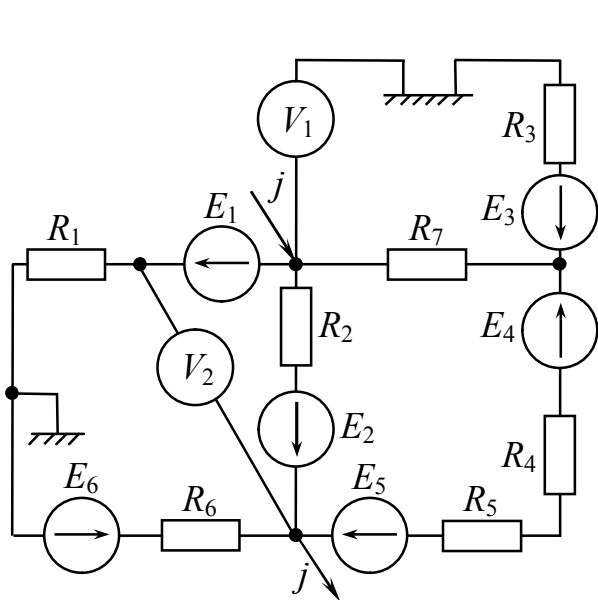


Рисунок 1.29

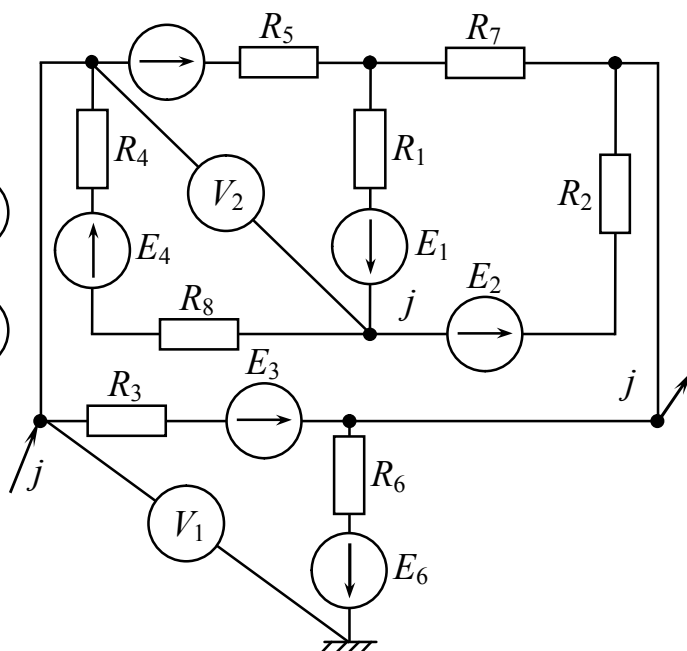


Рисунок 1.30

#### 1.4. Приклад розрахунку (рис. 1.31)

Робоче завдання

1. Провести перетворення у схемі, що досліджується, джерела струму  $j$  на еквівалентне джерело  $EPC E_j$ . Подальший розрахунок проводити для схеми з еквівалентним джерелом  $EPC E_j$ .

2. Розрахувати всі струми методом контурних струмів.

3. Провести баланс потужностей.

4. Побудувати для зовнішнього контуру потенціальну діаграму.

5. Розрахувати у загальному вигляді всі струми методом вузлових потенціалів.

6. Розрахувати струм вітки з  $EPC E_2$  методом еквівалентного генератора.

7. Визначити показання вольтметрів.

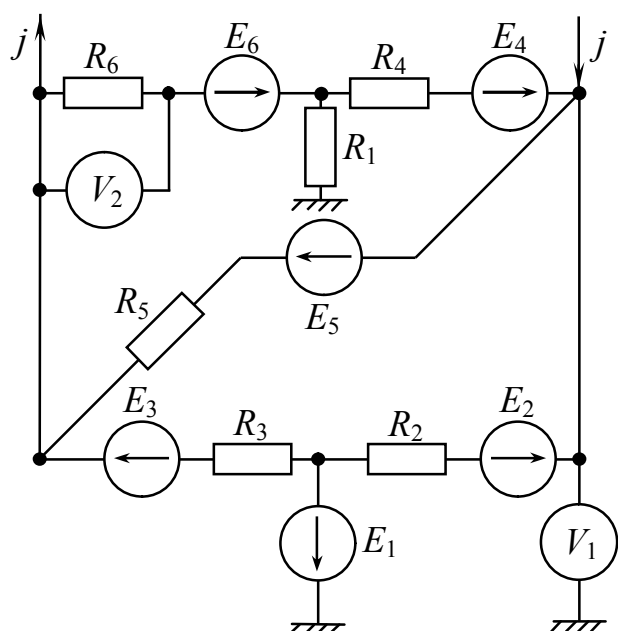


Рисунок 1.31 – Розрахункова схема

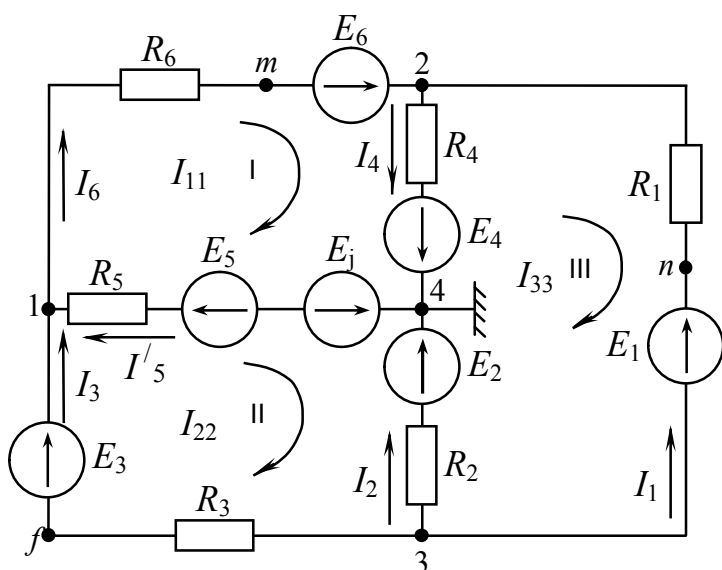


Рисунок 1.32 – Перетворена схема

Вихідна схема – рисунок 1.31.

Вихідні дані

$$R_1 = R_4 = 5 \text{ Ом}, R_2 = 4 \text{ Ом},$$

$$R_3 = 6 \text{ Ом}, R_5 = 8 \text{ Ом}$$

$$R_6 = 7 \text{ Ом}, E_1 = 55 \text{ В}; E_2 = 30 \text{ В};$$

$$E_3 = 40 \text{ В}; E_4 = 20 \text{ В};$$

$$E_5 = 50 \text{ В}; E_6 = 30 \text{ В}; j = 4 \text{ А}.$$

Примітка. розрахунок повинен починатися з наступної сторінки пояснювальної записки.

#### Виконання

1.4.1 Перетворення джерела струму  $j$  на еквівалентне джерело  $EPC E_j$ :  $E_j = j \cdot R_5 = 4 \cdot 8 = 32 \text{ В}$  рисунок 1.32.

1.4.2 Система рівнянь за законами Кірхгофа (для схеми з джерелом  $EPC E_j$ , рисунок 1.32).

За першим законом треба скласти  $n-1$  рівнянь, де  $n$  – кількість вузлів у схемі ( $4-1=3$ ).

За другим законом треба скласти  $m-n+1$  рівнянь, де  $m$  – кількість віток у схемі ( $6-4+1=3$ ).

У схемі рисунку 1.32 довільно задаємося напрямками струмів у вітках.

#### 1.4.3 Метод контурних струмів

У схемі на рисунку 1.32 довільно задаємося позитивними напрямками контурних струмів у вітках (доцільно – в одну сторону). Складаємо систему рівнянь у загальному вигляді для трьох незалежних контурів:

$$\begin{cases} I_{11} \cdot R_{11} + I_{22} \cdot R_{12} + I_{33} \cdot R_{13} = E_{11} \\ I_{11} \cdot R_{21} + I_{22} \cdot R_{22} + I_{33} \cdot R_{23} = E_{22} \\ I_{11} \cdot R_{31} + I_{22} \cdot R_{32} + I_{33} \cdot R_{33} = E_{33} \end{cases} .$$

Визначаємо коефіцієнти:

$$R_{11} = R_6 + R_4 + R_5 = 7 + 5 + 8 = 20 \text{ (Ом)} - \text{власний опір контура I};$$

$$R_{22} = R_5 + R_2 + R_3 = 8 + 4 + 6 = 18 \text{ (Ом)} - \text{власний опір контура II};$$

$$R_{33} = R_1 + R_2 + R_4 = 5 + 4 + 5 = 14 \text{ (Ом)} - \text{власний опір контура III};$$

$$R_{12} = R_{21} = -R_5 = -8 \text{ (Ом)} - \text{взаємний опір контурів I та II};$$

$$R_{13} = R_{31} = -R_4 = -5 \text{ (Ом)} - \text{взаємний опір контурів I та III};$$

$$R_{23} = R_{32} = -R_2 = -4 \text{ (Ом)} - \text{взаємний опір контурів II та III};$$

$$E_{11} = E_6 + E_4 - E_j + E_5 = 30 + 20 - 32 + 50 = 68 \text{ (В)} - \text{власна ЕРС контура № I};$$

$$E_{22} = E_3 - E_5 - E_2 + E_j = 40 - 50 - 30 + 32 = -8 \text{ (В)} - \text{власна ЕРС контура № II};$$

$$E_{33} = E_2 - E_4 - E_1 = 30 - 20 - 55 = -45 \text{ (В)} - \text{власна ЕРС контура № III}.$$

Після підстановки цифр система рівнянь набуває вигляду

$$\begin{cases} 20 \cdot I_{11} - 8 \cdot I_{22} - 5 \cdot I_{33} = 68 \\ -8 \cdot I_{11} + 18 \cdot I_{22} - 4 \cdot I_{33} = -8 \\ -5 \cdot I_{11} - 4 \cdot I_{22} + 14 \cdot I_{33} = -45 \end{cases} .$$

Визначаємо контурні струми, А:

$$I_{11} = 3,1133; \quad I_{22} = 0,50295; \quad I_{33} = -1,9594.$$

Визначаємо струми у вітках, А:  $I_1 = -I_{33} = 1,9594$ ;  $I_2 = I_{33} - I_{22} = -2,4623$ ;

$$I_3 = I_{22} = 0,50295; \quad I_4 = I_{11} - I_{33} = 3,1133 + 1,9594 = 5,0727;$$

$$I_5 = I_{11} - I_{22} = 3,1133 - 0,50295 = 2,61035; \quad I_6 = I_{11} = 3,1133.$$

#### 1.4.4 Баланс потужностей

Загальний вигляд балансу:  $\sum P_{ист} = \sum P_{нагр} .$

Для схеми з джерелом ЕРС  $E_j$  (рис. 1.32):

$$\begin{aligned} E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2 + E_3 \cdot I_3 + E_4 \cdot I_4 + (E_5 - E_j) \cdot I_5 + E_6 \cdot I_6 = \\ = I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2 + I_3^2 \cdot R_3 + I_4^2 \cdot R_4 + I_5^2 \cdot R_5 + I_6^2 \cdot R_6 \end{aligned} ,$$



$$55 \cdot 1,9594 + 30 \cdot (-2,4623) + 40 \cdot 0,50295 + 20 \cdot 5,0727 + 50 \cdot 2,6103 + 30 \cdot 3,1133 =$$

$$= 1,9594^2 \cdot 5 + (-2,4623)^2 \cdot 4 + 0,50295^2 \cdot 6 + 5,0727^2 \cdot 5 + 2,6103^2 \cdot 8 + 3,1133^2 \cdot 7$$

$$295,93 \approx 295,98 \text{ (Вт)}; \delta = \frac{295,93 - 295,98}{295,93} \cdot 100\% \approx 0,017\%$$

#### 1.4.5 Потенціальна діаграма для зовнішнього контуру (рис. 1.33)

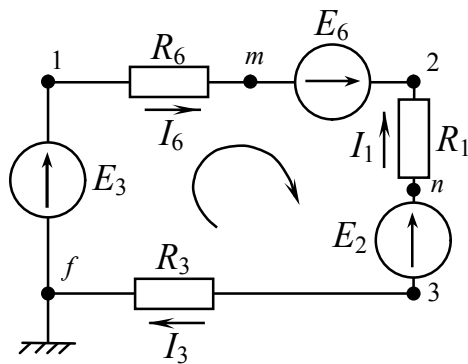


Рисунок 1.33 – Контур для побудови діаграми

Нехай  $\varphi_f = 0 \text{ В}$ . Тоді

$$\varphi_1 = \varphi_f + E_3 = 40 \text{ В};$$

$$\varphi_m = \varphi_1 - I_6 \cdot R_6 = 40 - 3,1133 \cdot 7 = 18,2069 \text{ В};$$

$$\varphi_2 = \varphi_m + E_6 = 18,2069 + 30 = 48,2069 \text{ В};$$

$$\varphi_n = \varphi_2 + I_1 \cdot R_1 = 48,2069 + 1,9594 \cdot 5 = 58,0044 \text{ В};$$

$$\varphi_3 = \varphi_n - E_1 = 58,0044 - 55 = 3,0044 \text{ В};$$

$$\varphi_f = \varphi_3 - I_3 \cdot R_3 = 3,0044 - 0,50295 \cdot 6 = -0,01 \approx 0 \text{ В}$$

Діаграма зображена на рисунку 1.34

#### 1.4.6 Метод вузлових потенціалів

Приймаємо потенціал одного з вузлів схеми рівним нулю:

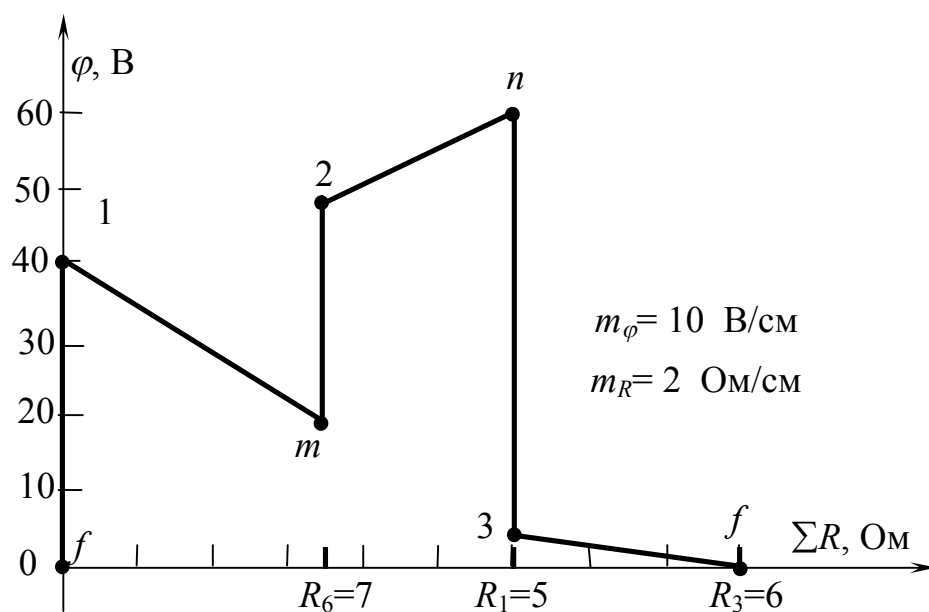


Рисунок 1.34 – Потенціальна діаграма

$\varphi_4=0$  – рисунок. 1.32. Система рівнянь відносно потенціалів інших вузлів:

$$\begin{cases} \varphi_1 \cdot G_{11} - \varphi_2 \cdot G_{12} - \varphi_3 \cdot G_{13} = \sum_1 E_i \cdot G_i \\ -\varphi_1 \cdot G_{21} + \varphi_2 \cdot G_{22} - \varphi_3 \cdot G_{23} = \sum_2 E_i \cdot G_i \\ -\varphi_1 \cdot G_{31} - \varphi_2 \cdot G_{32} + \varphi_3 \cdot G_{33} = \sum_3 E_i \cdot G_i, \end{cases}$$

де  $G_{11}, G_{22}, G_{33}$  власні провідності 1, 2, та 3 вузлів відповідно:

$$G_{11} = \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_3} = 0,4345 \text{ См}, \quad G_{22} = \frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_1} = 0,5428 \text{ См},$$

$$G_{33} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = 0,6167 \text{ См};$$

$G_{12} = G_{21}, G_{23} = G_{32}, G_{13} = G_{31}$  взаємні провідності вузлів:

$$G_{12} = G_{21} = \frac{1}{R_6} = \frac{1}{7} = 0,1428 \text{ См}, \quad G_{13} = G_{31} = \frac{1}{R_3} = \frac{1}{6} = 0,1667 \text{ См},$$

$$G_{23} = G_{32} = \frac{1}{R_1} = \frac{1}{5} = 0,2 \text{ См}.$$

Вузлові струми:

$$\sum_1 E_i \cdot G_i = \frac{E_3}{R_3} - \frac{E_6}{R_6} + \frac{E_5 - E_j}{R_5} = \frac{40}{6} - \frac{30}{7} + \frac{50 - 32}{8} = 4,6309 \text{ А};$$

$$\sum_2 E_i \cdot G_i = \frac{E_6}{R_6} - \frac{E_4}{R_4} + \frac{E_1}{R_1} = \frac{30}{7} - \frac{20}{5} + \frac{55}{5} = 11,2857 \text{ А};$$

$$\sum_3 E_i \cdot G_i = -\frac{E_1}{R_1} - \frac{E_2}{R_2} - \frac{E_3}{R_3} = -\frac{55}{5} - \frac{30}{4} - \frac{40}{6} = -25,1667 \text{ А}.$$

З підставленими значеннями коефіцієнтів система набуває вигляду

$$\begin{cases} \varphi_1 \cdot 0,4345 - \varphi_2 \cdot 0,1428 - \varphi_3 \cdot 0,1667 = 4,6309 \\ -\varphi_1 \cdot 0,1428 + \varphi_2 \cdot 0,5428 - \varphi_3 \cdot 0,2 = 11,2857 \\ -\varphi_1 \cdot 0,1667 - \varphi_2 \cdot 0,2 + \varphi_3 \cdot 0,6167 = -25,1667 \end{cases}$$

З системи знаходимо потенціали вузлів, а потім струми за законом Ома, А:

$$I_1 = \frac{\varphi_3 - \varphi_2 + E_1}{R_1}; \quad I_2 = \frac{\varphi_3 - \varphi_4 + E_2}{R_2}; \quad I_3 = \frac{\varphi_3 - \varphi_1 + E_3}{R_3}; \quad I_4 = \frac{\varphi_2 - \varphi_4 + E_4}{R_4};$$

$$I_5 = \frac{\varphi_4 - \varphi_1 + E_5 - E_j}{R_6}; \quad I_6 = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + E_6}{R_6}.$$

#### 1.4.7 Розрахунок струму вітки з EPC $E_2$ методом еквівалентного генератора

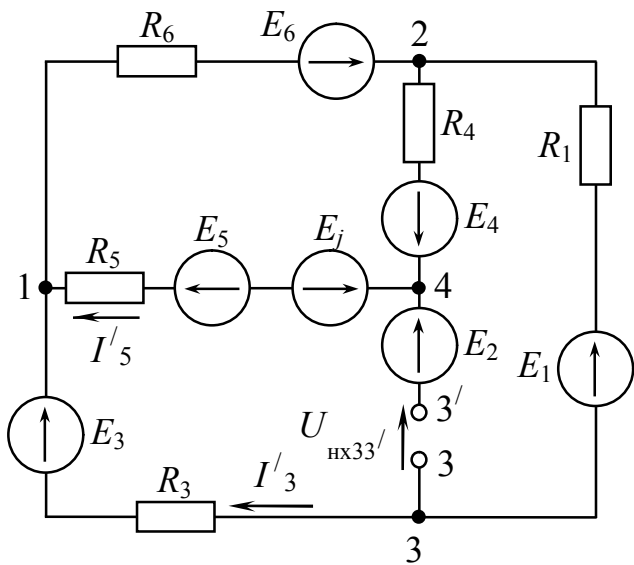


Рисунок 1.35 – Схема з вилученням  $R_2$

Робимо розрив у вітці з EPC  $E_2$  – рисунок 1.35.

$$\text{За методом: } I_2 = \frac{U_{\text{нх}}}{R_{\text{вх}} + R_2}.$$

Визначаємо напругу неробочого ходу  $U_{\text{нх}} = U_{\text{хх33}}'$  на затискачах розриву.

За другим законом Кірхгофа

$$E_2 - E_j + E_5 - E_3 = U_{\text{хх}} + I_5' \cdot R_5 - I_3' \cdot R_3$$

Тобто

$$U_{\text{нх}} = E_2 - E_j + E_5 - E_3 - I_5' \cdot R_5 + I_3' \cdot R_3.$$

Знаходимо струми неробочого

ходу  $I_5', I_3'$  за методом двох вузлів:

$$U_{12\text{хх}} = \frac{\frac{E_4 - E_j + E_5}{R_5 + R_4} - \frac{E_6}{R_6} + \frac{E_3 - E_1}{R_1 + R_3}}{\frac{1}{R_5 + R_4} + \frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_1 + R_3}} = \frac{\frac{20 - 32 + 50}{8 + 5} - \frac{30}{7} + \frac{40 - 55}{5 + 6}}{\frac{1}{8 + 5} + \frac{1}{7} + \frac{1}{5 + 6}} = -8,7749 \text{ В};$$

$$I_5' = \frac{-U_{12\text{хх}} + E_4 + E_5 - E_j}{R_5 + R_4} = \frac{8,7749 + 20 + 50 - 32}{8 + 5} = 3,5981 \text{ А};$$

$$I_3' = \frac{-U_{12\text{хх}} + E_3 - E_1}{R_1 + R_3} = \frac{8,7749 + 40 - 55}{5 + 6} = -0,5659 \text{ А}.$$

Таким чином, напруга неробочого ходу:

$$U_{\text{нх}} = 30 - 32 + 50 - 40 - 3,5981 \cdot 8 - 0,5659 \cdot 6 = -24,18 \text{ В}.$$

Визначаємо вхідний опір  $R_{\text{вх}}$  відносно вхідних затискачів 3 та 3'.

Схема для визначення  $R_{\text{вх}}$  подана на рисунку 1.36, а.

Перетворимо трикутник опорів  $R_6 - R_5 - R_4$  в еквівалентну зірку опорів

$R_{65} - R_{54} - R_{64}$ . Одержимо схему на рисунку 1.36, б.

$$R_{65} = \frac{R_6 \cdot R_5}{R_6 + R_5 + R_4} = \frac{7 \cdot 8}{7 + 8 + 5} = 2,667 \text{ Ом}, \quad R_{54} = \frac{R_5 \cdot R_4}{R_6 + R_5 + R_4} = \frac{8 \cdot 5}{7 + 8 + 5} = 2 \text{ Ом},$$

$$R_{64} = \frac{R_6 \cdot R_4}{R_6 + R_5 + R_4} = \frac{7 \cdot 5}{7 + 8 + 5} = 1,75 \text{ Ом}, \quad R_{641} = R_{64} + R_1 = 1,75 + 5 = 6,75 \text{ Ом}$$

$$R_{653} = R_{65} + R_3 = 2,667 + 6 = 8,667 \text{ Ом}$$

Вираз для визначення  $R_{\text{вх}}$  (рис. 1.36, в):

$$R_{\text{ex}} = R_{54} + \frac{R_{641} \cdot R_{653}}{R_{641} + R_{653}} = 2 + \frac{6,75 \cdot 8,667}{6,75 + 8,667} = 5,795 \text{ Ом.}$$

$$\text{Остаточню} - I_2 = \frac{U_{\text{нх}}}{R_{\text{ex}} + R_2} = \frac{-24,18}{5,795 + 4} = -2,4686 \text{ А.}$$

#### 1.4.8 Показання вольметрів $V_1$ і $V_2$

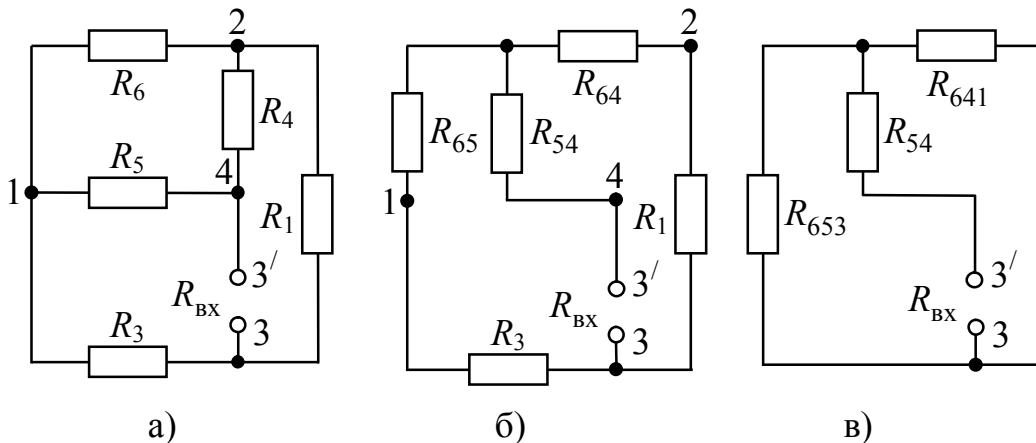


Рисунок 1.36 Схеми для визначення  $R_{\text{ex}}$

Вольметр  $V_1$  приєднаний до затискачів 1 і m (див. рис. 1.31, 1.32), тобто він вимірює напругу  $U_{1m}$ :  $U_{1m} = I_6 \cdot R_6 = 3,11 \cdot 7 = 21,77 \text{ В.}$

Вольметр  $V_2$  приєднаний до затискачів n і 4 (див. рис. 1.31, 1.32), тобто він вимірює напругу  $U_{n4}$ :

$$U_{n4} = E_1 - E_2 + I_2 \cdot R_2 = 55 - 30 + (-2,462) \cdot 4 = 15,152 \text{ В.}$$

#### 1.5 Контрольні запитання до першої частини РГР

1. Сформулювати закони Кірхгофа, надати порядок розрахунку кіл за законами Кірхгофа.
2. Поясніть, як проводять розрахунок за методом контурних струмів. Наведіть можливі особливості методу.
3. Поясніть, як проводять розрахунок за методом вузових потенціалів. Наведіть можливі особливості методу.
4. Як здійснюють побудову потенціальної діаграми для замкнутого контуру?
5. Наведіть правила складання балансу для електричних кіл, що містять джерела струму та джерела ЕРС.
6. Сформулюйте теорему про активний двополюсник.
7. Наведіть порядок розрахунку струму однієї вітки за методом активного двополюсника (еквівалентного генератора).
8. Порівняйте методи розрахунку електричних кіл постійного струму.

## 2 РОЗРАХУНОК СКЛАДНОГО КОЛА СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ

### 2.1 Мета роботи

- вивчити комплексний метод розрахунку електричного кола гармонійного струму;
- навчитися складати баланс активних і реактивних потужностей для кіл синусоїдного струму;
- вивчити методику побудови векторно-топографічних діаграм.

### 2.2. Робоче завдання до другої частини розрахунково-графічної роботи

#### 2.2.1 Комплексним методом визначити струми у всіх вітках.

#### 2.2.2 Скласти баланс активних і реактивних потужностей.

2.2.3 Записати вирази миттєвих значень  $EPC$  і загального струму, побудувати сумісні графіки залежностей цих величин від часу.

2.2.4 Для схеми побудувати векторну діаграму струмів і для контуру, що задається викладачем – векторно-топографічну діаграму напруг.

### 2.3 Підготовка до роботи

2.3.1 Накреслити схему кола відповідно до свого варіанта (номер варіанта схеми відповідає номеру студента в журналі викладача) – рисунки 2.1–2.30. Числові дані елементів схем взяти з таблиці 2.1 відповідно факультету і номеру групи.

2.3.2 схемі кола позначити напрямки струмів у вітках.

2.3.3 Проробити теоретичний матеріал за темою роботи: [2] – с. 81–106; [3] – с. 61–100.

### 2.4 Порядок і методика проведення розрахунку

#### 2.4.1 Визначення комплексним методом струмів у вітках.

Спочатку визначають комплексні опори гілок, потім складають. За допомогою згортання схеми і закону Ома в комплексній формі визначають комплекси струмів.

#### 2.4.2 Складання балансу активних і реактивних потужностей.

Спочатку визначають повну, активну, реактивну потужності кожної вітки, а потім повну, активну, реактивну потужності всього кола. Розходження між активною потужністю джерела енергії і активною потужністю навантаження не повинно перевищувати 5%. Аналогічно – для реактивної потужності.

2.4.3 Побудова векторної діаграми струмів і векторно-топографічної діаграми напруг.

Виконання. Спочатку на комплексній площині будують векторну діаграму струмів і, користуючись напрямками цих струмів, будують векторно-топографічну діаграму напруг для контуру.

Таблиця 2.1 – Вихідні дані для розрахунку

Позначення на схемах	Числові дані по групах		
	Номери груп		
	1	2	3
$R_1$ , Ом	6	35	40
$R_2$ , Ом	4	30	20
$R_3$ , Ом	4	20	10
$R_4$ , Ом	5	20	30
$R_5$ , Ом	8	26	20
$L_1$ , мГ	40	4	10
$L_2$ , мГ	10	10	50
$L_3$ , мГ	60	3	30
$L_4$ , мГ	50	5	40
$L_5$ , мГ	20	8	20
$C_1$ , мкФ	200	10	100
$C_2$ , мкФ	250	14	200
$C_3$ , мкФ	400	20	300
$C_4$ , мкФ	300	24	100
$C_5$ , мкФ	150	16	400
$E$ , В	200	280	50
$\varphi_E$ , град	90	50	45
$f$ , Гц	400	500	50

Приклад розрахунку (пункт 2.5) наведений нижче.

## ВАРІАНТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМ

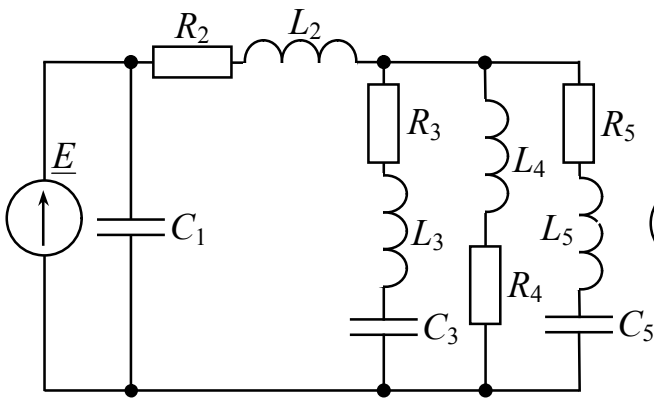


Рисунок 2.1

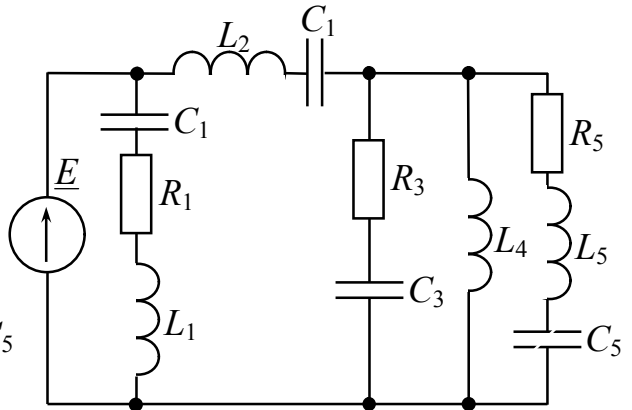


Рисунок 2.2

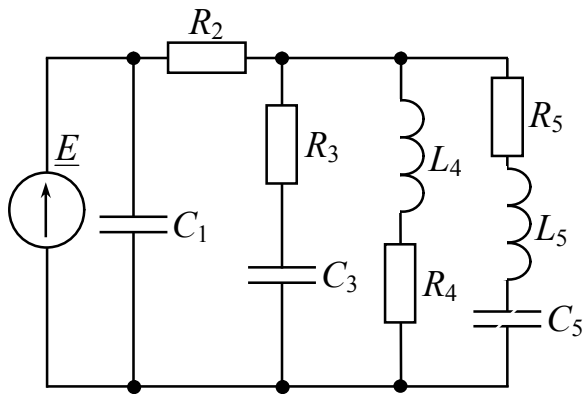


Рисунок 2.3

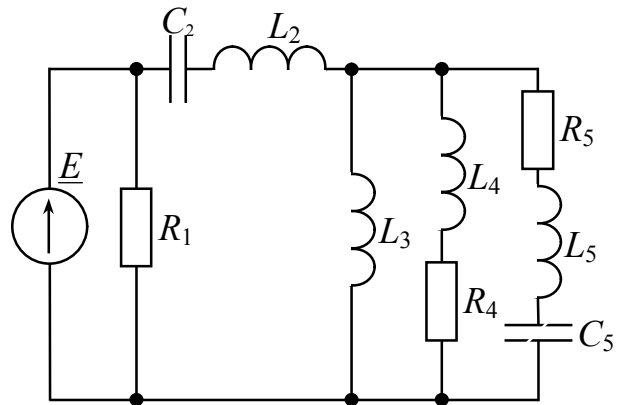


Рисунок 2.4

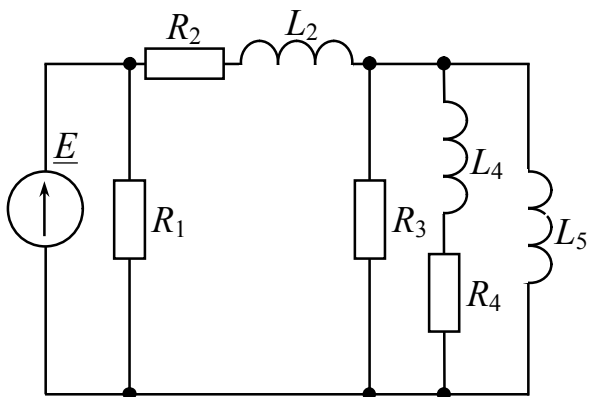


Рисунок 2.5

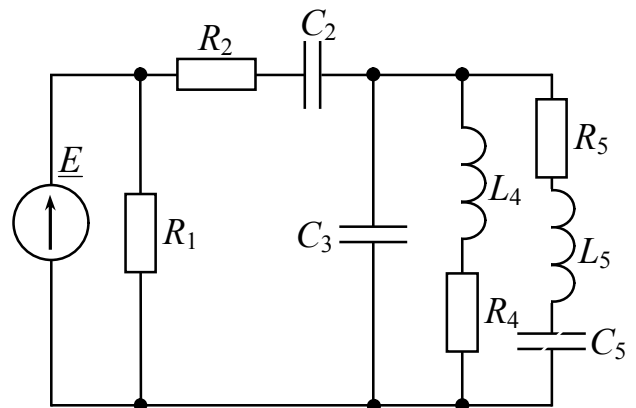


Рисунок 2.6

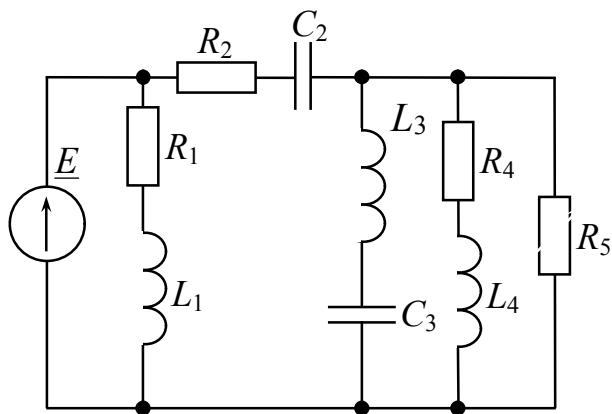


Рисунок 2.7

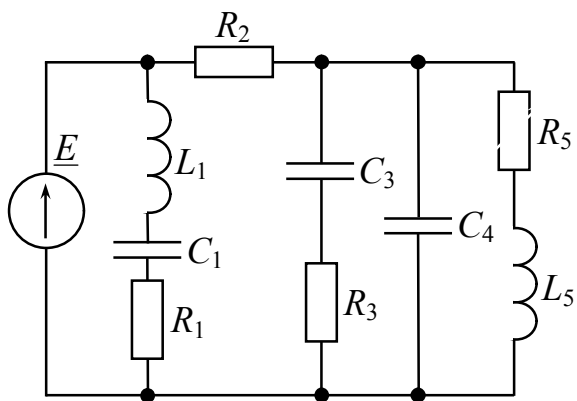


Рисунок 2.8

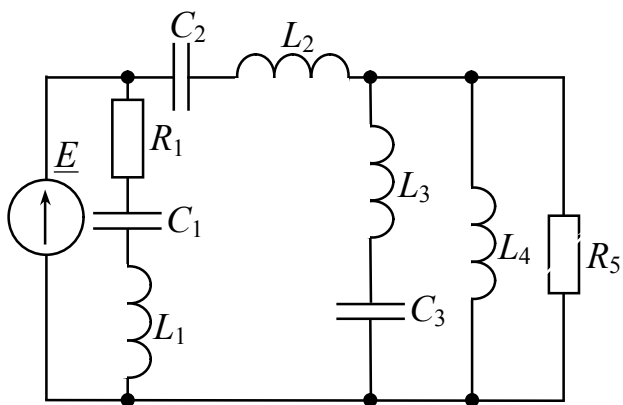


Рисунок 2.9

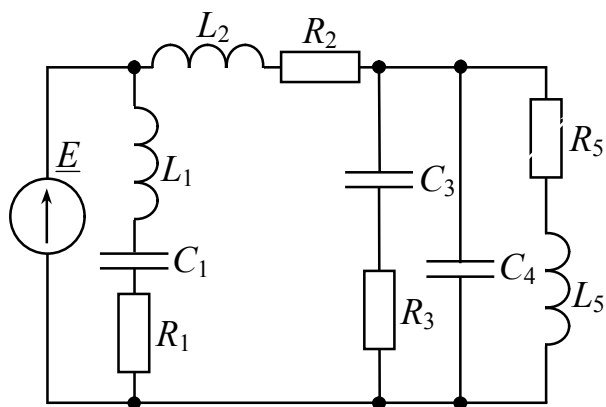


Рисунок 2.10

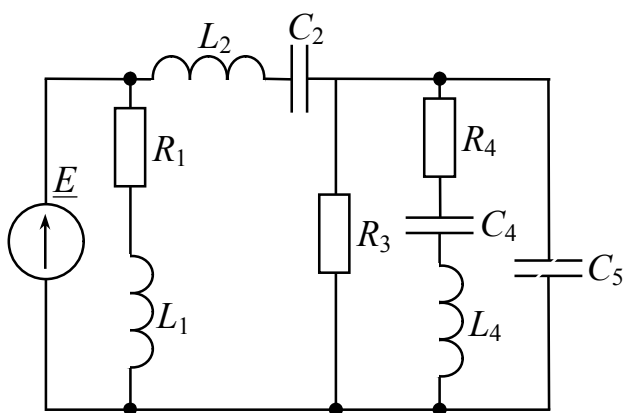


Рисунок 2.11

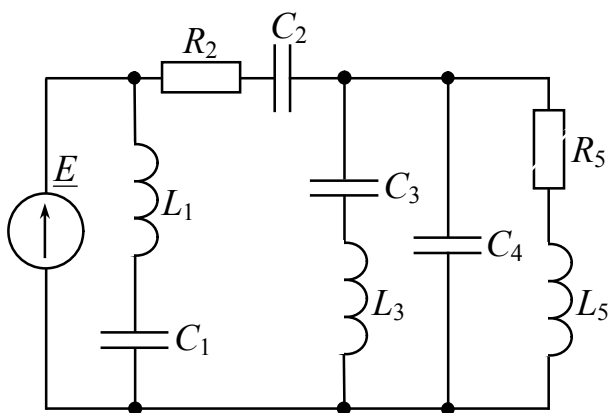


Рисунок 2.12



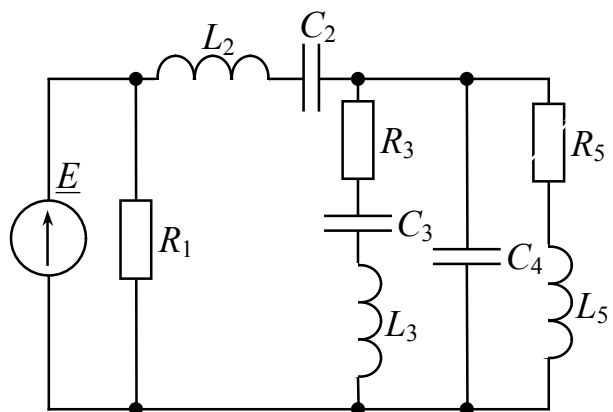


Рисунок 2.13

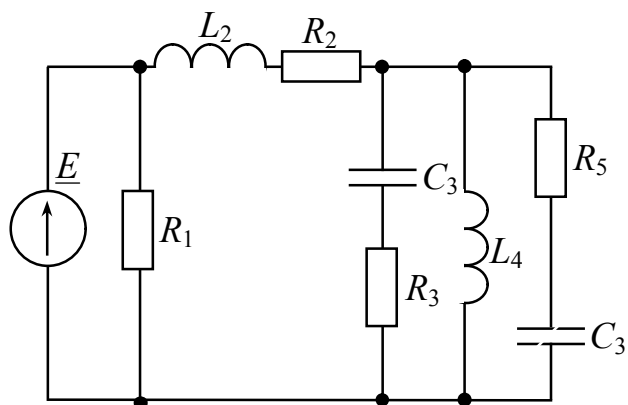


Рисунок 2.14

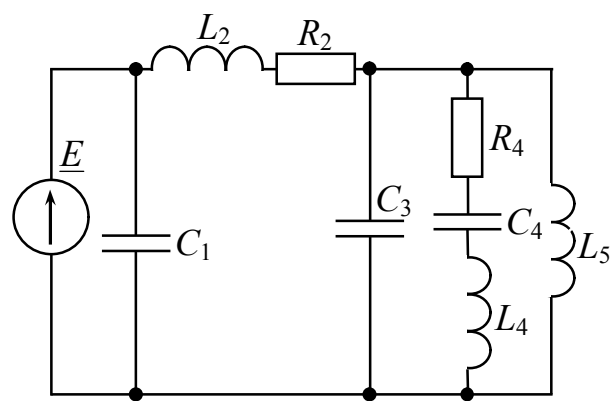


Рисунок 2.15

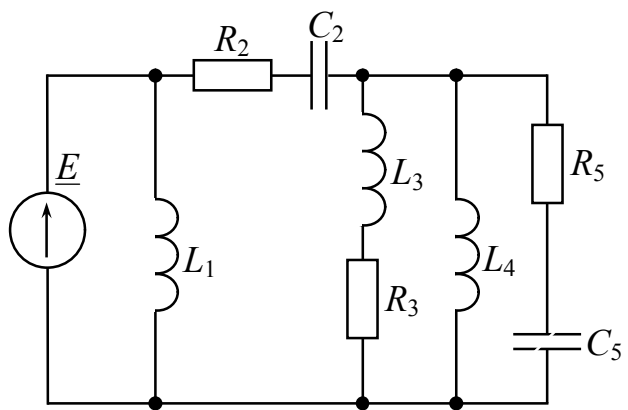


Рисунок 2.16

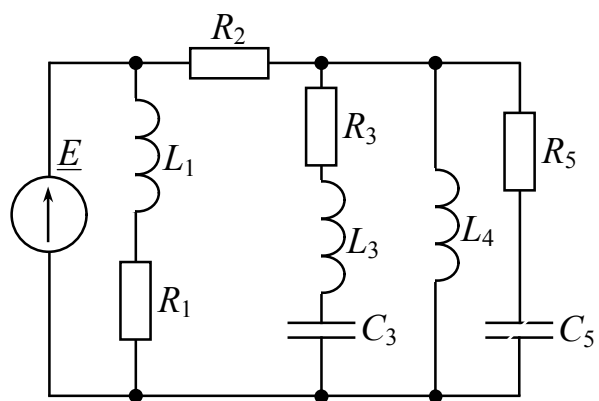


Рисунок 2.17

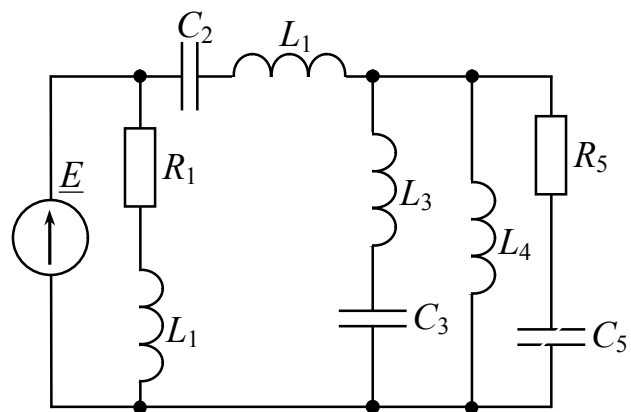


Рисунок 2.18

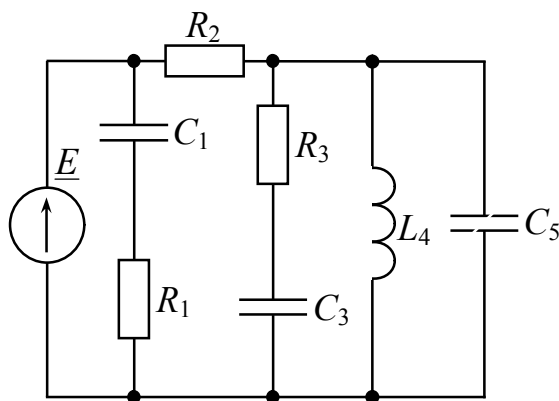


Рисунок 2.19

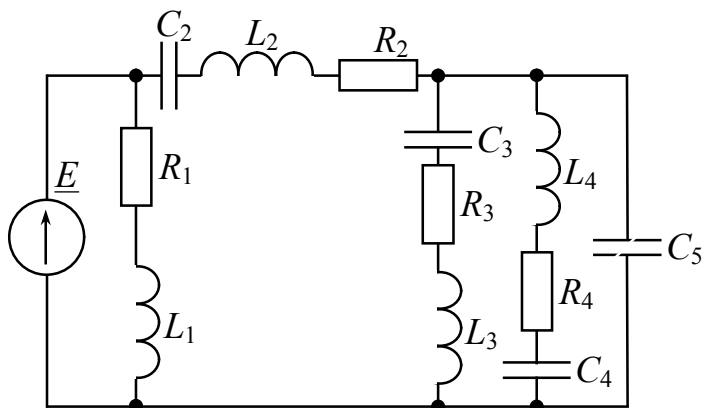


Рисунок 2.20

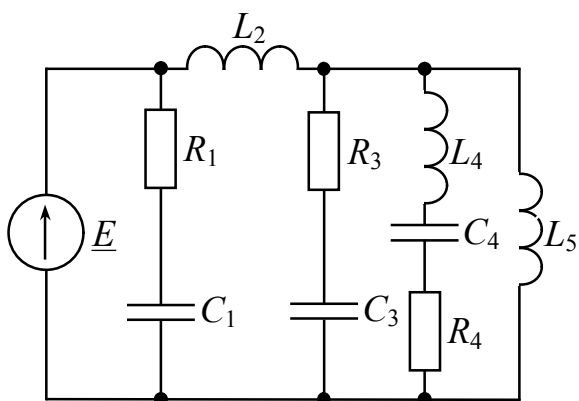


Рисунок 2.21

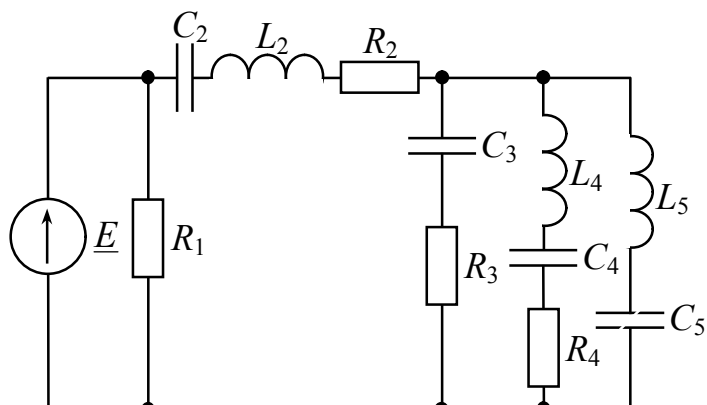


Рисунок 2.22

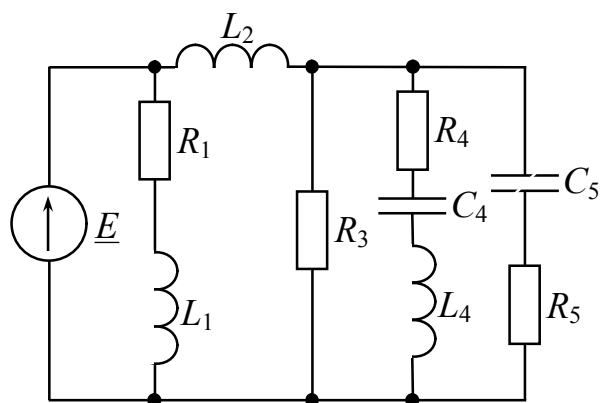


Рисунок 2.23

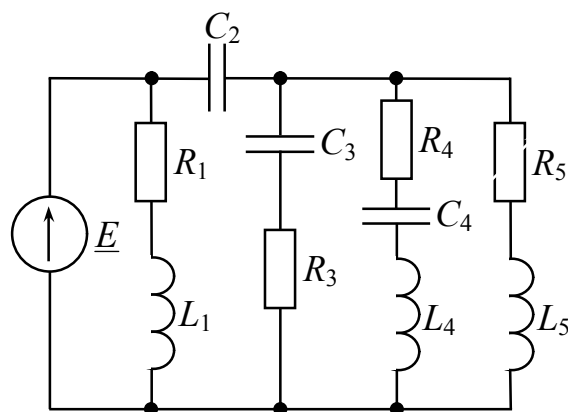


Рисунок 2.24

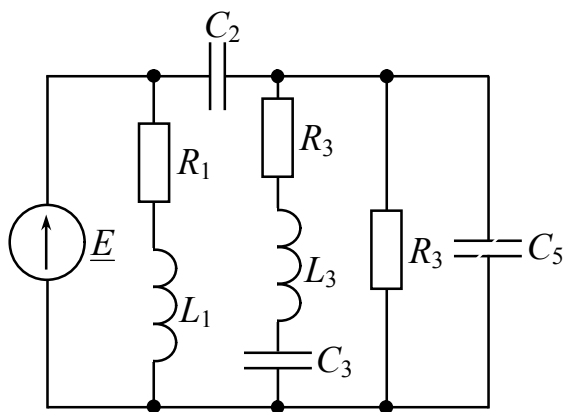


Рисунок 2.25

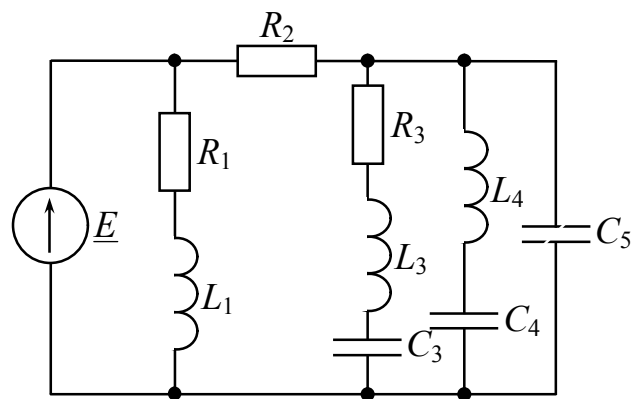


Рисунок 2.26

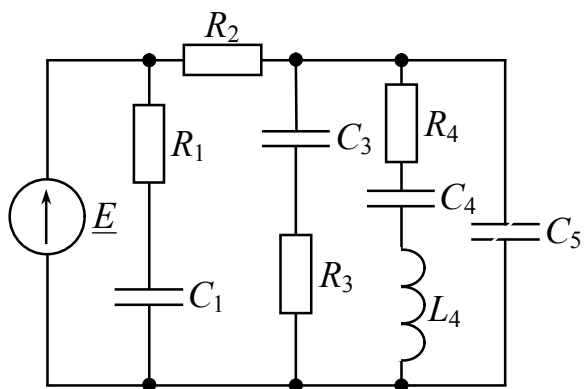


Рисунок 2.27

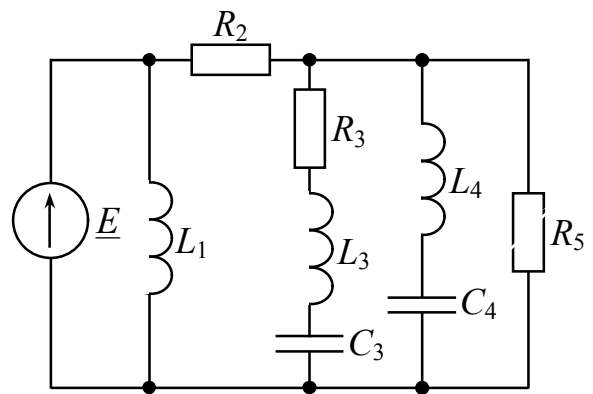


Рисунок 2.28

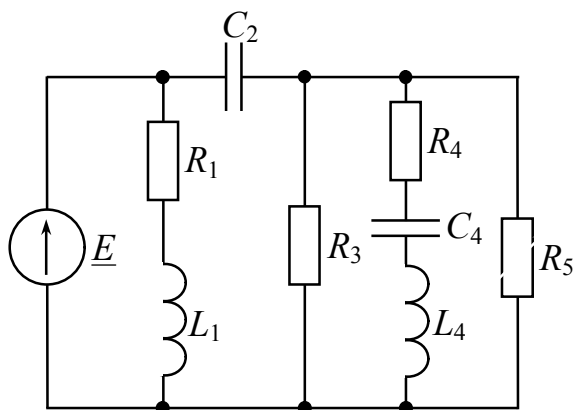


Рисунок 2.29

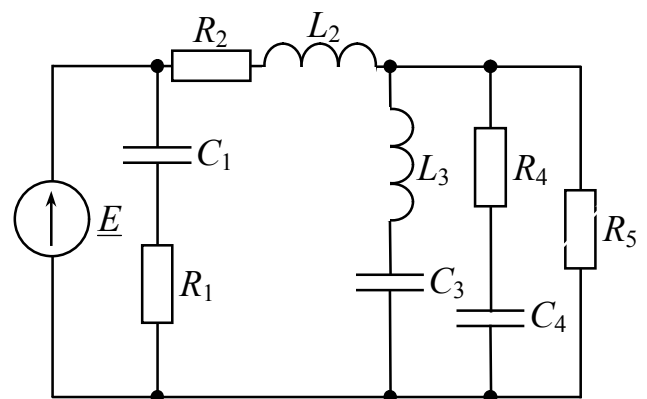


Рисунок 2.30

## 2.5 Приклад розрахунку (рис. 2.31)

### Робоче завдання

1. Комплексним методом визначити струми у всіх вітках.
2. Скласти баланс активних і реактивних потужностей.

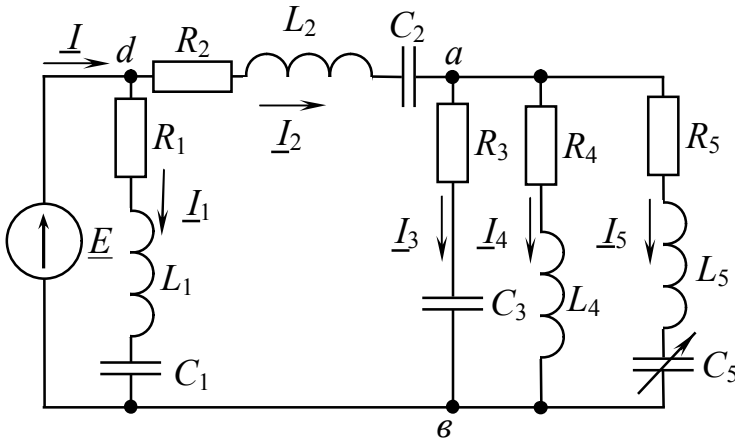


Рисунок 2.31 – Розрахункова схема

3. Записати вирази миттєвих значень  $EPC$  і загального струму, побудувати сумісні графіки залежностей цих величин від часу.

4. Для схеми побудувати векторну діаграму струмів і для контуру, що задається викладачем – векторно-топографічну діаграму напруг.

Вихідна схема – рисунок 2.31.

Вихідні дані:  $R_1=10$  Ом,  $R_2=12$  Ом,  $R_3=8$  Ом,  $R_4=10$  Ом,  $R_5=6$  Ом,  $E=200$  В,  $\varphi_E=30^\circ$ ,  $f=400$  Гц,  $L_1=6$  мГн,  $L_2=4$  мГн,  $L_4=6$  мГн,  $L_5=6$  мГн,  $C_1=90$  мкФ,  $C_2=40$  мкФ,  $C_3=80$  мкФ,  $C_5=100$  мкФ.

### 2.5.1 Визначаємо комплексні опори кожної вітки

Кутова частота:  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot 3,14 \cdot 400 = 2512$  (рад/с).

Комплексні опори віток:

$$\underline{Z}_1 = R_1 + j \cdot \left( \omega \cdot L_1 - \frac{1}{\omega \cdot C_1} \right) = 10 + j \cdot \left( 2512 \cdot 6 \cdot 10^{-3} - \frac{1}{2512 \cdot 90 \cdot 10^{-6}} \right) =$$

$$= 10 + j \cdot (15,07 - 4,42) = 10 + j \cdot 10,65 = 14,61 \cdot e^{j \cdot 46,8^\circ} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_2 = R_2 + j \cdot \left( \omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2} \right) = 12 + j \cdot \left( 2512 \cdot 4 \cdot 10^{-3} - \frac{1}{2512 \cdot 40 \cdot 10^{-6}} \right) =$$

$$= 12 + j \cdot (10,05 - 9,95) = 12 + j \cdot 0,1 = 12,0004 \cdot e^{j \cdot 0,48^\circ} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_3 = R_3 - j \cdot \frac{1}{\omega \cdot C_3} = 8 - j \cdot \frac{1}{2512 \cdot 80 \cdot 10^{-6}} = 8 - j \cdot 4,98 = 9,42 \cdot e^{-j \cdot 31,9^\circ} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_4 = R_4 + j \cdot \omega \cdot L_4 = 10 + j \cdot 2512 \cdot 6 \cdot 10^{-3} = 10 + j \cdot 15,07 = 18,09 \cdot e^{j \cdot 56,4^\circ} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_5 = R_5 + j \cdot \left( \omega \cdot L_5 - \frac{1}{\omega \cdot C_5} \right) = 6 + j \cdot \left( 2512 \cdot 6 \cdot 10^{-3} - \frac{1}{2512 \cdot 100 \cdot 10^{-6}} \right) =$$

$$= 6 + j \cdot (15,07 - 3,98) = 6 + j \cdot 11,09 = 12,61 \cdot e^{j \cdot 61,6^\circ} \text{ Ом}.$$

### 2.5.2 Визначаємо струми в вітках для перетвореної схеми (рис. 2.32)

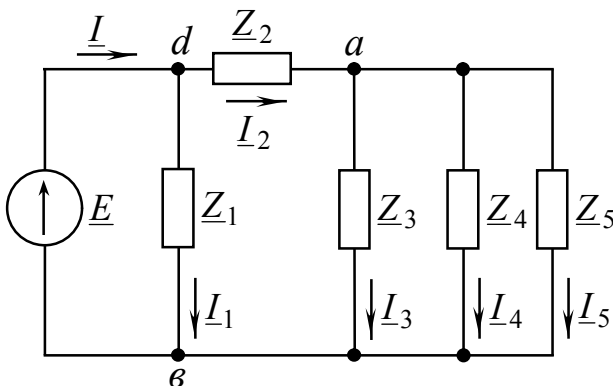


Рисунок 2.32 – Еквівалентна схема

Для цього проводимо заміну паралельного з'єднання опорів  $\underline{Z}_3, \underline{Z}_4, \underline{Z}_5$  еквівалентним опором  $\underline{Z}_{345}$ :

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{34} &= \frac{\underline{Z}_3 \cdot \underline{Z}_4}{\underline{Z}_3 + \underline{Z}_4} = \frac{9,42 \cdot e^{j(-31,9)^\circ} \cdot 18,09 \cdot e^{j56,4^\circ}}{8 - j \cdot 4,98 + 10 + j \cdot 15,07} = \\ &= \frac{170,41 \cdot e^{j24,5^\circ}}{18 + j \cdot 10,09} = \frac{170,41 \cdot e^{j24,5^\circ}}{20,635 \cdot e^{j29,273^\circ}} = \\ &= 8,258 \cdot e^{j(-4,77)^\circ} = 8,22 - j \cdot 0,686 \text{ Ом}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{345} &= \frac{\underline{Z}_{34} \cdot \underline{Z}_5}{\underline{Z}_{34} + \underline{Z}_5} = \frac{8,258 \cdot e^{j(-4,77)^\circ} \cdot 12,61 \cdot e^{j61,6^\circ}}{8,22 - j \cdot 0,686 + 6 + j \cdot 11,09} = \frac{104,13 \cdot e^{j56,83^\circ}}{14,22 + j \cdot 10,404} = \\ &= 5,91 \cdot e^{j20,63^\circ} = 5,53 + j \cdot 2,08 \text{ Ом}.\end{aligned}$$

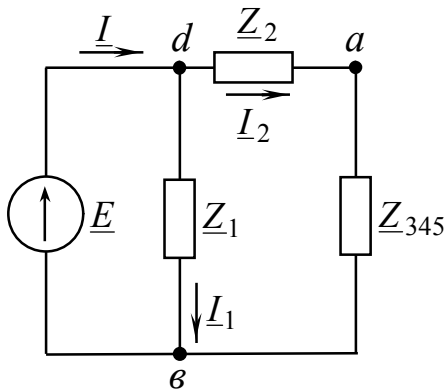


Рисунок 2.33 –  
Перетворена схема

За законом Ома:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_1} = \frac{200 \cdot e^{j30^\circ}}{14,61 \cdot e^{j46,8^\circ}} = 13,69 \cdot e^{j(-16,8)^\circ} = 13,11 - j \cdot 3,96 \text{ А},$$

$$\begin{aligned}\underline{I}_2 &= \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_{345}} = \frac{200 \cdot e^{j30^\circ}}{12 + j \cdot 0,1 + 5,53 + j \cdot 2,08} = \frac{200 \cdot e^{j30^\circ}}{17,53 + j \cdot 2,18} = \frac{200 \cdot e^{j30^\circ}}{17,665 \cdot e^{j7,09^\circ}} = \\ &= 11,32 \cdot e^{j22,91^\circ} = 10,427 + j \cdot 4,406 \text{ А}.\end{aligned}$$

Загальний струм визначаємо за першим законом Кірхгофа, або за законом Ома:

$$\underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 = 13,11 - j \cdot 3,96 + 10,427 + j \cdot 4,406 = 23,537 + j \cdot 0,446 = 23,541 \cdot e^{j1,085^\circ} \text{ А},$$

Після заміни схема набуває вигляду – рисунок 2.33.

Опір  $\underline{Z}_{345}$  можна також розрахувати наступним чином:

- $\underline{Y}_3 = \frac{1}{\underline{Z}_3}$ ;  $\underline{Y}_4 = \frac{1}{\underline{Z}_4}$ ;  $\underline{Y}_5 = \frac{1}{\underline{Z}_5}$  – провідності паралельних віток, См;
- $\underline{Y}_{345} = \underline{Y}_3 + \underline{Y}_4 + \underline{Y}_5$  – еквівалентна провідність паралельних віток, См;
- $\underline{Z}_{345} = \frac{1}{\underline{Y}_{345}}$  – еквівалентний опір паралельних віток, Ом.

$$\underline{I} = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_{12345}} = \frac{\underline{E}}{\frac{\underline{Z}_1 \cdot (\underline{Z}_2 + \underline{Z}_{345})}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_{345}}} = 23,537 + j \cdot 0,446 = 23,541 \cdot e^{j \cdot 1,085^\circ} \text{ А.}$$

Визначаємо за законом Ома напругу та струми в паралельних вітках:

$$\underline{U}_{a6} = \underline{I}_2 \cdot \underline{Z}_{345} = 11,32 \cdot e^{j \cdot 22,91^\circ} \cdot 5,91 \cdot e^{j \cdot 20,63^\circ} = 66,9 \cdot e^{j \cdot 43,54^\circ} = 48,49 + j \cdot 46,08 \text{ В.}$$

$$\underline{I}_3 = \frac{\underline{U}_{a6}}{\underline{Z}_3} = \frac{66,96 \cdot e^{j \cdot 43,54^\circ}}{9,42 \cdot e^{j \cdot (-31,9)^\circ}} = 7,108 \cdot e^{j \cdot 75,44^\circ} = 1,78 + j \cdot 6,88 \text{ А.}$$

$$\underline{I}_4 = \frac{\underline{U}_{a6}}{\underline{Z}_4} = \frac{66,96 \cdot e^{j \cdot 43,54^\circ}}{18,09 \cdot e^{j \cdot 56,4^\circ}} = 3,701 \cdot e^{j \cdot (-12,86)^\circ} = 3,608 - j \cdot 0,823 \text{ А.}$$

$$\underline{I}_5 = \frac{\underline{U}_{a6}}{\underline{Z}_5} = \frac{66,96 \cdot e^{j \cdot 43,54^\circ}}{12,61 \cdot e^{j \cdot 61,6^\circ}} = 5,31 \cdot e^{j \cdot (-18,06)^\circ} = 5,048 - j \cdot 1,646 \text{ А.}$$

Перевірка за першим законом Кірхгофа:

$$\underline{I}_2 = \underline{I}_3 + \underline{I}_4 + \underline{I}_5 = 1,78 + j \cdot 6,88 + 3,608 - j \cdot 0,823 + 5,048 - j \cdot 1,646 = 10,436 + j \cdot 4,41 = 11,329 \cdot e^{j \cdot 22,9^\circ} \text{ А.}$$

### 2.5.3 Складаємо баланс реактивних та активних потужностей

Комплекс повної потужності першої вітки:

$$\tilde{S}_1 = \underline{E} \cdot \underline{I}_1^* = 200 \cdot e^{j \cdot 30^\circ} \cdot 13,69 \cdot e^{j \cdot 16,8^\circ} = 2738 \cdot e^{j \cdot 46,8^\circ} = 1874,29 + j \cdot 1995,9 \text{ ВА.}$$

активна потужність  $P_1 = 1874,29 \text{ Вт}$ , реактивна потужність  $Q_1 = 1995,9 \text{ ВАр}$ .

Комплекс повної потужності другої вітки:

$$\begin{aligned} \tilde{S}_2 &= (\underline{E} - \underline{U}_{ab}) \cdot \underline{I}_2^* = \underline{U}_{da} \cdot \underline{I}_2^* = \underline{I}_2^2 \cdot \underline{Z}_2 = \left( 200 \cdot e^{j \cdot 30^\circ} - 66,9 \cdot e^{j \cdot 43,54^\circ} \right) \cdot 11,32 \cdot e^{j \cdot (-22,91)^\circ} = \\ &= (173,2 + j \cdot 100 - 48,49 - j \cdot 46,08) \cdot 11,32 \cdot e^{j \cdot (-22,91)^\circ} = (124,71 + j \cdot 53,92) \cdot \\ &\cdot 11,32 \cdot e^{j \cdot (-22,91)^\circ} = 135,86 \cdot e^{j \cdot 23,38^\circ} \cdot 11,32 \cdot e^{j \cdot (-22,91)^\circ} = \\ &= 1537,93 \cdot e^{j \cdot 0,47^\circ} = 1537,88 + j \cdot 12,61 \text{ ВА.} \end{aligned}$$

Активна потужність  $P_2 = 1537,88 \text{ Вт}$ , реактивна потужність  $Q_2 = 12,61 \text{ ВАр}$ .

Комплекс повної потужності третьої вітки:

$$\begin{aligned} \tilde{S}_3 &= \underline{U}_{ab} \cdot \underline{I}_3^* = 66,9 \cdot e^{j \cdot 43,54^\circ} \cdot 7,108 \cdot e^{j \cdot (-75,44)^\circ} = \\ &= 475,52 \cdot e^{j \cdot (-31,99)^\circ} = 403,703 - j \cdot 251,28 \text{ ВА.} \end{aligned}$$

Активна потужність  $P_3 = 403,703 \text{ Вт}$ , реактивна потужність  $Q_3 = -251,28 \text{ ВАр}$ .

Комплекс повної потужності четвертої вітки:

$$\begin{aligned}\tilde{S}_4 &= \underline{U}_{ab} \cdot \underline{I}_4^* = 66,9 \cdot e^{j \cdot 43,54^\circ} \cdot 3,701 \cdot e^{j \cdot 12,86^\circ} = \\ &= 247,6 \cdot e^{j \cdot 56,54^\circ} = 137,019 + j \cdot 206,23 \text{ ВА.}\end{aligned}$$

Активна потужність  $P_4 = 137,019$  Вт; реактивна потужність  $-Q_4 = 206,23$  ВАр.

Комплекс повної потужності п'ятої вітки:

$$\begin{aligned}\tilde{S}_5 &= \underline{U}_{ab} \cdot \underline{I}_5^* = 66,9 \cdot e^{j \cdot 43,54^\circ} \cdot 5,31 \cdot e^{j \cdot 18,06^\circ} = 355,24 \cdot e^{j \cdot 61,6^\circ} = \\ &= 168,96 + j \cdot 312,48 \text{ ВА.}\end{aligned}$$

Активна потужність  $-P_5 = 168,96$  Вт; реактивна потужність  $-Q_5 = 312,48$  ВАр.

Комплекс повної потужності для всього кола:

$$\begin{aligned}\tilde{S} &= \underline{E} \cdot \underline{I}^* = 200 \cdot e^{j \cdot 30^\circ} \cdot 23,541 \cdot e^{j \cdot (-1,085)^\circ} = 4708,2 \cdot e^{j \cdot 28,915^\circ} = \\ &= 4121,465 + j \cdot 2276,109 \text{ ВА.}\end{aligned}$$

Активна потужність  $P = 4121,465$  Вт; реактивна потужність  $-Q = 2276,11$  ВАр.

Перевіряємо баланс активних потужностей:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 = 1874,29 + 1537,88 + 403,703 + 137,019 + 168,96 = 4121,852 \text{ Вт.}$$

$$4121,465 \approx 4121,852, \text{ Вт} \Rightarrow \text{розходження} - 0,009\%.$$

Перевіряємо баланс реактивних потужностей:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 = 1995,9 + 12,61 - 251,28 + 206,23 + 312,48 = 2275,94 \text{ ВА}.$$

$$2276,11 \approx 2275,94, \text{ ВАр} \Rightarrow \text{розходження} - 0,007\%.$$

2.5.4 Записуємо вирази для миттєвих значень ЕРС ( $e(t)$ ) та загального струму ( $i(t)$ ); будуємо сумісні графіки залежностей цих величин від часу

$$\begin{aligned}e(t) &= E_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_u) = 200 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\left(2512 \cdot t + 30^\circ \cdot \frac{\pi}{180^\circ}\right) = \\ &= 282,84 \cdot \sin\left(2512 \cdot t + 30^\circ \cdot \frac{\pi}{180^\circ}\right), \text{ В.}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}i(t) &= I_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_i) = 23,541 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\left(2512 \cdot t + 1,085^\circ \cdot \frac{\pi}{180^\circ}\right) = \\ &= 33,29 \cdot \sin\left(2512 \cdot t + 1,085^\circ \cdot \frac{\pi}{180^\circ}\right), \text{ А.}\end{aligned}$$

Графіки залежностей величин  $e(\omega t)$  та  $i(\omega t)$  представлені на рисунку 2.34.

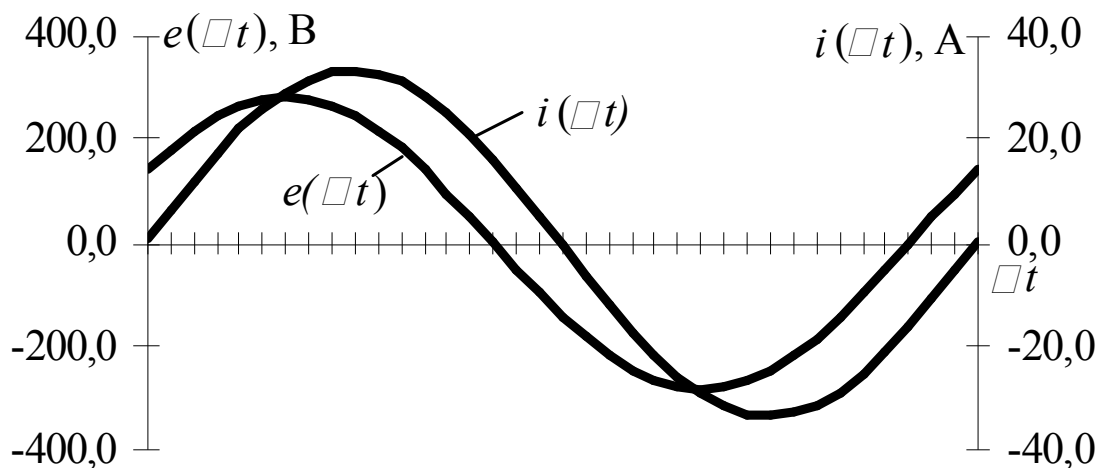


Рисунок 2.34 – Графіки залежностей величин  $e(\omega t)$  та  $i(\omega t)$

### 2.5.5 Побудова векторної діаграми струмів та векторно-топографічної діаграми напруг

Будуємо на комплексній площині в обраному масштабі усі струми відповідно до їх напрямків відносно осі дійсних чисел. Якщо, наприклад, обраний масштаб за струмом  $m_1 = 1,5 \frac{\text{A}}{\text{см}}$ , то вектор струму  $\underline{I}_1$  має довжину 9,12 см і розташований під кутом « $-16,8^\circ$ » до вісі дійсних чисел.

Векторно-топографічну діаграму напруг будуємо для зовнішнього контуру схеми  $b-c-e-a-g-k-d$  – рисунок 2.35. Припустимо, що потенціал точки «в» дорівнює нулю ( $\varphi_b = 0$ ), тому розташовуємо точку «в» у початку координат на комплексній площині.

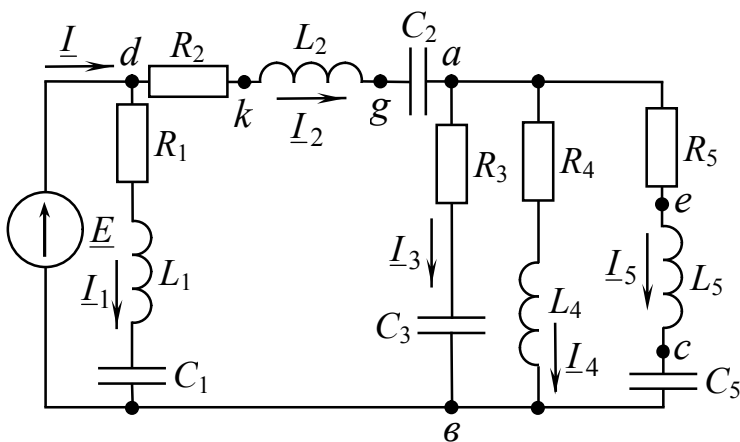


Рисунок. 2.35 – Схема з урахуванням характеру кожної вітки

Для ділянки контуру “ $aecb$ ”: напруга  $\underline{U}_{cb} = \varphi_c - \varphi_b = \underline{I}_5 \cdot \underline{X}_{C5}$  відстає від струму  $\underline{I}_5$  на кут  $90^\circ$  за фазою, напруга  $\underline{U}_{ec} = \varphi_e - \varphi_c = \underline{I}_5 \cdot \underline{X}_{L5}$  випереджає струм  $\underline{I}_5$  за фазою, а напруга  $\underline{U}_{ae} = \varphi_a - \varphi_e = \underline{I}_5 \cdot R_5$  співпадає зі струмом  $\underline{I}_5$  за фазою.

Для вітки “ $dkga$ ”: напруга



$\underline{U}_{ga} = \underline{\varphi}_g - \underline{\varphi}_a = \underline{I}_2 \cdot \underline{X}_{C_2}$  відстає від струму  $\underline{I}_2$  на кут  $90^\circ$  за фазою, напруга  $\underline{U}_{kg} = \underline{\varphi}_k - \underline{\varphi}_g = \underline{I}_2 \cdot \underline{X}_{L_2}$  випереджає струм  $\underline{I}_2$  за фазою на кут  $90^\circ$ ; а напруга  $\underline{U}_{dk} = \underline{\varphi}_d - \underline{\varphi}_k = \underline{I}_2 \cdot R_2$  співпадає зі струмом  $\underline{I}_2$  за фазою.

Вибираємо масштаб за напругою –  $m_U = 11 \frac{\text{В}}{\text{см}}$ .

Модулі падіння напруги на ділянках дорівнюють, В:

$$\begin{aligned} U_{cb} &= I_5 \cdot X_{C_5} = 5,31 \cdot 3,98 = 21,13 [1,92 \text{ см}]; & U_{ec} &= I_5 \cdot X_{L_5} = 5,31 \cdot 15,07 = 80 [7,27 \text{ см}]; \\ U_{ae} &= I_5 \cdot R_5 = 5,31 \cdot 6 = 31,86 [2,89 \text{ см}]; & U_{ga} &= I_2 \cdot X_{C_2} = 11,32 \cdot 9,95 = 112,63 [10,2 \text{ см}]; \\ U_{kg} &= I_2 \cdot X_{L_2} = 11,32 \cdot 10,05 = 113,8 [10,3 \text{ см}]; & U_{dk} &= I_2 \cdot R_2 = 11,32 \cdot 12 = 135,84 [12,3 \text{ см}]; \\ U_{ds} &= E = 200 [18,2 \text{ см}] \end{aligned}$$

У квадратних дужках поряд із значеннями модулів напруг вказані довжини векторів напруг на векторно-топографічній діаграмі в обраному масштабі

$$m_U = 11 \frac{\text{В}}{\text{см}}.$$

Векторна діаграма струмів та векторно-топографічна діаграма напруг представлена на рисунку 2.36.

## 2.6 Контрольні запитання до другої частини РГР

1. Дайте визначення синусоїдного струму і основних величин, що його характеризують.
2. Дайте визначення середнього, діючого значення синусоїдної величини.
3. Поясніть, які існують методи розрахунку електричних кіл синусоїдного струму?
4. Поясніть, як здійснюють баланс реактивних і активних потужностей?
5. Запишіть вирази для комплексної провідності ділянки кола.
6. Проаналізуйте зв'язок реактивної провідності і реактивного опору, активної провідності і активного опору.
7. Поясніть, як здійснюють побудову векторно-топографічної діаграми струмів і напруг для розгалуженого кола синусоїдного струму?

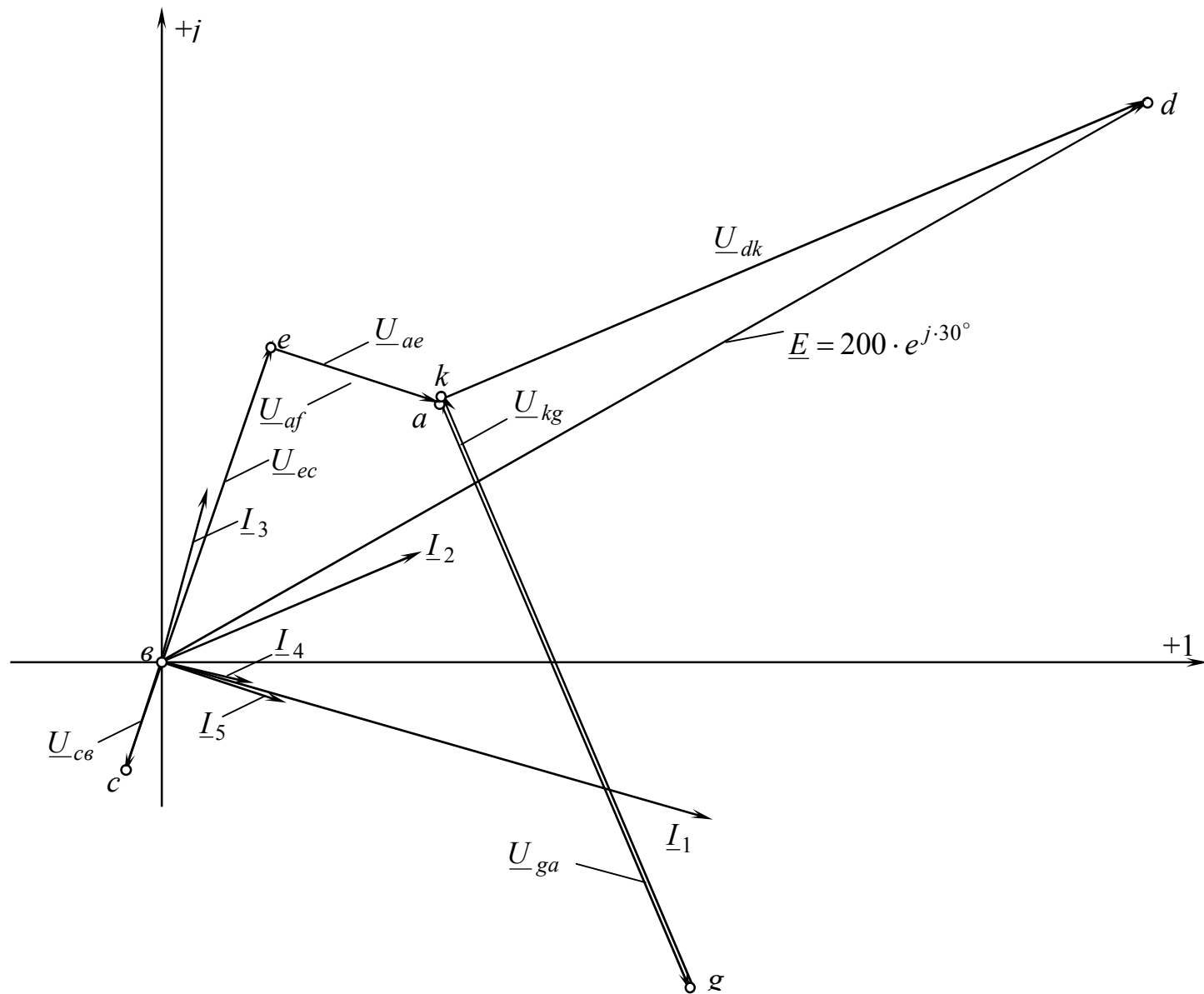


Рисунок 2.36 – Векторна діаграма струмів та векторно-топографічна діаграма напруг

### 3 РОЗРАХУНОК ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У ЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

#### 3.1 Мета роботи

- оволодіти класичним методом розрахунку
- розрахувати струм  $i(t)$  і напруги  $u_C(t)$ ,  $u_L(t)$  класичним методом при послідовному замиканні 1-го та 2-го ключів.

#### 3.2 Підготовка до роботи

3.2.1 Накреслити схему кола при замиканні першого, а потім – при замиканні другого ключа з вказівкою напрямку струму  $i_1(t)$  і напрямів напруг на реактивних елементах.

3.2.2 Вихідні дані для розрахунку наведені в таблиці 3.1 (варіант визначають за номером студента в журналі викладача); схеми, які необхідно розрахувати, наведені на рисунках 3.1–3.2. Номер схеми визначається таким чином: студенти, що мають парний номер свого варіанта, розраховують схему рисунку 3.1,а, непарний – схему рисунку 3.1,б.

2.3.3 Проробити теоретичний матеріал за темою роботи: [2] – с. 226–258; [3] – с. 234–258.

#### 3.3 Робоче завдання до третьої частини розрахунково-графічної роботи

3.3.1 Розрахувати струм  $i(t)$  і напруги  $u_C(t)$ ,  $u_L(t)$  класичним методом під час замикання першого ключа.

3.3.2 Розрахувати струм  $i(t)$  і напругу  $u_C(t)$  для схеми рисунку 3.1 (або  $u_L(t)$  для схеми рисунку 3.2) класичним методом під час замикання другого ключа.

3.3.3 Побудувати залежність струму  $i(t)$  для моментів часу відповідно:

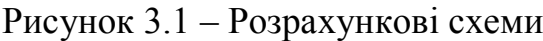
0;  $0,25 \cdot \tau_1$ ;  $0,5 \cdot \tau_1$ ;  $0,75 \cdot \tau_1$ ;  $\tau_1$  та 0;  $0,25 \cdot \tau_2$ ;  $0,5 \cdot \tau_2$ ;  $0,75 \cdot \tau_2$ ;  $\tau_2$ .

Примітка. другий ключ замикається тоді, коли від моменту замикання першого ключа пройшов час  $t = \tau_1$  ( $\tau_1$  – стала часу перехідного процесу при замиканні першого ключа). Якщо корені характеристичного рівняння комплексно-спряжені, то сталу часу розраховують за формулою:  $\tau = \frac{T}{8} = \frac{2 \cdot \pi}{\omega_0 \cdot 8}$ ,

$$\tau = \frac{T}{8} = \frac{2 \cdot \pi}{\omega_0 \cdot 8},$$

де  $T, \omega_0$  – період і кругова частота вільних коливань перехідного процесу.

Якщо корінь характеристичного рівняння – дійсне від'ємне число, то стала часу має вигляд  $\tau = \frac{1}{|p|}$ .



Таблиця 3.1 – Вихідні дані для розрахунку

Номер варіанту	$R$ , Ом	$L$ , мГн	$E$ , В	$C$ , мкФ		
				Номер групи		
				1	2	3
1	50	100	100	110	130	150
2	70	200	200	120	140	160
3	80	300	300	130	150	170
4	90	400	400	140	160	180
5	100	500	500	150	170	190
6	40	100	100	160	180	200
7	50	200	200	170	190	210
8	70	300	300	180	200	220
9	80	400	400	190	210	230
10	90	500	500	200	220	240
11	30	100	100	210	230	250
12	50	200	200	220	240	260
13	60	300	300	230	250	270
14	70	400	400	240	260	280
15	80	500	500	250	270	290
16	30	100	100	260	280	300
17	40	200	200	270	290	310
18	50	300	300	280	300	320
19	60	400	400	290	310	330
20	70	500	500	300	320	340
21	30	100	100	310	330	350
22	40	200	200	320	340	360
23	50	300	300	330	350	370
24	50	400	400	340	360	380
25	60	500	500	350	370	390
26	20	100	100	360	380	400
27	40	200	200	370	390	410
28	50	300	300	380	400	420
29	50	400	400	390	410	430
30	60	500	500	400	420	440

### 3.4 Приклад розрахунку

#### Робоче завдання

1. Розрахувати струм  $i(t)$  і напруги  $u_C(t)$ ,  $u_L(t)$  класичним методом під час замикання першого ключа.

2. Розрахувати струм  $i(t)$  і напругу  $u_C(t)$  для схеми рисунку 3.1 (або  $u_L(t)$  для схеми рисунку 3.2) класичним методом під час замикання другого ключа.

3. Побудувати залежність струму  $i(t)$  для моментів часу відповідно:

$0; 0,25 \cdot \tau_1; 0,5 \cdot \tau_1; 0,75 \cdot \tau_1; \tau_1$  та  $0; 0,25 \cdot \tau_2; 0,5 \cdot \tau_2; 0,75 \cdot \tau_2; \tau_2$ .

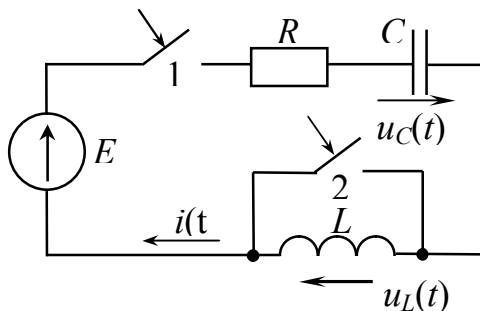


Рисунок 3.2 –  
Розрахункова схема

Вихідна схема – рисунок 3.2.

Вихідні дані:  $R = 30 \text{ Ом}$ ,  $E = 300 \text{ В}$ ,

$L = 300 \text{ мГн}$ ,  $C = 370 \text{ мкФ}$ .

#### 3.4.1 Розрахунок класичним методом при замиканні першого ключа

Після замикання першого ключа схема матиме вигляд – рисунок 3.3. Рішення для  $i(t)$  та  $u_C(t)$  шукаємо у вигляді:

$$i(t) = i_{np} + i_{\epsilon}; \quad u_C(t) = u_{Cnp} + u_{C\epsilon}$$

Незалежні початкові умови:

$$i(0-) = i(0) = i(0+) = 0 \text{ (А)}, \quad u_C(0-) = u_C(0) = u_C(0+) = 0 \text{ (В)}.$$

Примусові складові рішень:  $u_{Cnp} = E = 300 \text{ В}$ ,  $i_{np} = 0$ .

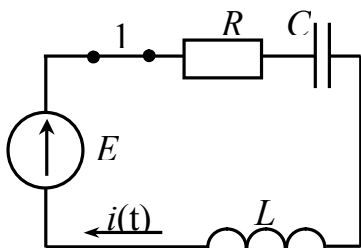


Рисунок 3.3 – Схема в  
проміжок часу  $0 < t < \tau_1$

Характеристичне рівняння для схеми рисунку 3.4:

$$Z_{\text{ex}}(p) = R + L \cdot p + \frac{1}{p \cdot C} = 0.$$

$$\text{Або: } p^2 + \frac{R}{L} \cdot p + \frac{1}{L \cdot C} = 0.$$

Після підстановки вихідних даних характеристичне рівняння набуває вигляду:

$$p^2 + 100 \cdot p + 9009 = 0. \text{ Корені рівняння:}$$

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2 \cdot L} \pm j \cdot \frac{\sqrt{\left(\frac{R}{L}\right)^2 - 4/(L \cdot C)}}{2} = -\epsilon \pm j \cdot \omega_0 \cdot t = -50 \pm j \cdot 80,5 \quad - \text{комплесно-спряжені, тому вільна складова напруги на ємності має такий вигляд:}$$

$u_{C\epsilon} = A \cdot e^{-50t} \cdot \sin(80,5 \cdot t + \alpha),$

$$u_{C\epsilon} = A \cdot e^{-50t} \cdot \sin(80,5 \cdot t + \alpha),$$

де  $\epsilon$ ,  $\omega_0$  – відповідно показчик затухання і кутова частота вільних коливань.

Таким чином,  $u_C(t) = 300 + A \cdot e^{-50t} \cdot \sin(80,5 \cdot t + \alpha).$

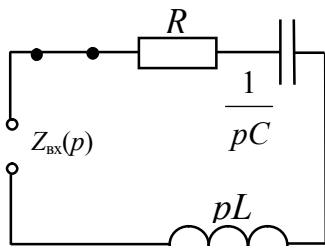


Рисунок 3.4

$$\begin{aligned} \text{З іншого боку: } i(t) &= C \cdot \frac{du_C(t)}{dt} = \\ &= C \cdot e^{-50t} \cdot (A \cdot (-50) \cdot \sin(80,5 \cdot t + \alpha) + A \cdot 80,5 \cdot \cos(80,5 \cdot t + \alpha)). \end{aligned}$$

Для визначення  $A$ ,  $\alpha$  скористаємось початковими умовам, тобто

$$u_C(0) = 0 = 300 + A \cdot \sin \alpha \Rightarrow A \cdot \sin \alpha = -300. \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} i(0) &= C \cdot \left. \frac{du_C(t)}{dt} \right|_{t=0} = 0 = C \cdot (A \cdot (-50) \cdot \sin \alpha + A \cdot 80,5 \cdot \cos \alpha) \Rightarrow \\ 0 &= A \cdot (-50) \cdot \sin \alpha + A \cdot 80,5 \cdot \cos \alpha. \end{aligned} \quad (3.2)$$

Вирішуємо систему рівнянь (3.1) та (3.2):

$$\begin{cases} A \cdot \sin \alpha = -300 \\ 0 = A \cdot (-50) \cdot \sin \alpha + A \cdot 80,5 \cdot \cos \alpha \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} A = -353,15 \\ \alpha = 58,15^\circ \end{cases}.$$

Звідки  $u_C(t) = 300 - 353,15 \cdot e^{-50t} \cdot \sin(80,5 \cdot t + 58,15^\circ)$ , В;

$$\begin{aligned} i(t) &= 370 \cdot 10^{-6} \cdot (-353,15 \cdot (-50) \cdot e^{-50t} \cdot \sin(80,5 \cdot t + 58,15^\circ) - 353,15 \cdot 80,5 \cdot \\ &\cdot e^{-50t} \cdot \cos(80,5 \cdot t + 58,15^\circ)) = 370 \cdot 10^{-6} \cdot (-353,15) \cdot (-1) \cdot e^{-50t} \cdot (50 \cdot \sin(80,5 \cdot t + 58,15^\circ) - \\ &- 80,5 \cdot \cos(80,5 \cdot t + 58,15^\circ)) = 0,13066 \cdot e^{-50t} \cdot \sqrt{50^2 + 80,5^2} \cdot \\ &\cdot \sin(80,5 \cdot t + 58,15 - \arctg(80,5/50)) = \underline{12,38 \cdot e^{-50t} \cdot \sin(80,5 \cdot t)}, \text{ А.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_L(t) &= L \cdot \frac{di(t)}{dt} = 0,3 \cdot 12,38 \cdot e^{-50t} \cdot ((-50) \cdot \sin(80,5 \cdot t) + 80,5 \cdot \cos(80,5 \cdot t)) = \\ &= \underline{-351,94 \cdot e^{-50t} \cdot \sin(80,5 \cdot t - 58,15^\circ)}, \text{ В} \end{aligned}$$

Примітка. Була використана формула  $a \cdot \sin \alpha \pm b \cdot \cos \alpha = \sqrt{a^2 + b^2} \cdot \sin\left(\alpha \pm \arctg \frac{b}{a}\right)$ .

Для побудови графіка залежності  $i(t) = 12,38 \cdot e^{-50t} \cdot \sin(80,5 \cdot t)$  визначаємо

$$\text{сталу часу } \tau_1 = \frac{T}{8} = \frac{2 \cdot \pi}{\omega_0 \cdot 8} = 0,0098 \text{ с} = 9,8 \text{ мс}$$

Таблиця 3.2 – Результати обчислень струму  $i(t)$

$t$ , мс	0	$0,25 \cdot \tau_1 = 2,45$	$0,5 \cdot \tau_1 = 4,9$	$0,75 \cdot \tau_1 = 7,35$	$\tau_1 = 9,8$
$i(t)$ , А	0	2,15	3,73	4,75	5,38

Розрахуємо також  $u_C(\tau_1)$  для визначення незалежної початкової умови на другому етапі розрахунку:

$$u_C(0,0098) = 300 - 353,15 \cdot e^{-50 \cdot 0,0098} \cdot \sin(80,5 \cdot 0,0098 + 58,15^\circ \cdot \pi / 180^\circ) = 89,5 \text{ В.}$$

### 3.4.2 Розрахунок класичним методом при замиканні другого ключа (парні варіанти)

Після замикавання другого ключа схема матиме вигляд як на рисунку 3.6. Рішення для  $u_C(t)$  шукаємо у вигляді:  $u_C(t) = u_{Cnp} + u_{C\epsilon}$

Незалежна початкова умови:  $u_C(0^-) = u_C(0) = u_C(0^+) = 89,5$  (В).

Примусова складова рішення:

$$u_{Cnp} = E = 300 \text{ В.}$$

Характеристичне рівняння:

$$Z_{\text{ex}}(p) = R + \frac{1}{p \cdot C} = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow u_C(t) = u_{Cnp} + u_{C\epsilon} = 300 + A \cdot e^{-90,1 \cdot t}, \text{ В.}$$

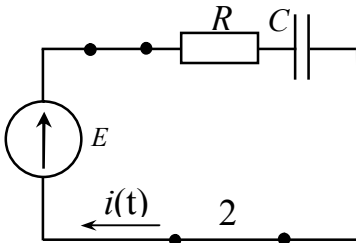


Рисунок 3.5 – Схема в проміжку часу  $t > \tau_1$

$$\text{Якщо } t=0, \text{ то } 89,5 = 300 + A \Rightarrow A = -210,5 \Rightarrow$$

$$u_C(t) = 300 - 210,5 \cdot e^{-90,1 \cdot t}, \text{ В.}$$

$$\text{Струм} - i(t) = C \cdot \frac{du_C(t)}{dt} = 370 \cdot 10^{-6} \cdot (-210,5) \cdot (-90,1) \cdot e^{-90,1 \cdot t} = 7,02 \cdot e^{-90,1 \cdot t}, \text{ А.}$$

Для побудови графіка залежності  $i(t) = 7,02 \cdot e^{-90,1 \cdot t}$  визначаємо сталу часу

$$\tau_1 = \frac{1}{|p|} = 0,011 \text{ (с)} \text{ і розрахуємо струм у декількох точках.}$$

Таблиця 3.3 – Результати обчислень струму  $i(t)$

$t, \text{ мс}$	0	$0,25 \cdot \tau_2 = 2,75$	$0,5 \cdot \tau_2 = 5,5$	$0,75 \cdot \tau_2 = 8,25$	$\tau_2 = 11$
$i(t), \text{ А}$	7,02	5,48	4,28	3,34	2,61

Графік залежності  $i(t)$  подано на рисунку 3.10.

### Розрахунок класичним методом при замиканні другого ключа (непарні варіанти)

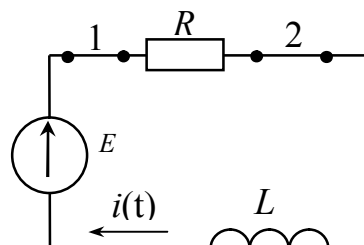


Рисунок 3.6 – Схема в проміжок часу  $t > \tau_1$

Після замикавання другого ключа схема матиме вигляд – рисунок 3.6.

Незалежна початкова умова  $i(0) = i(\tau_1) = 5,38$  А.

$$i(t) = i_{np} + i_{\epsilon}, \text{ де } i_{np} = \frac{E}{R} = 10 \text{ А.}$$

Характеристичне рівняння (схема на рис.3.9):

$$Z_{\text{ex}}(p) = R + p \cdot L = 0 \Rightarrow p = -\frac{R}{L} = -100$$

$$c^{-1} \Rightarrow i_{\epsilon} = A \cdot e^{-100 \cdot t} \Rightarrow i(t) = 10 + A \cdot e^{-100 \cdot t}, \text{ А}$$

Якщо  $t=0$ , то  $5,38 = 10 + A \Rightarrow A = -4,62 \Rightarrow \underline{i(t) = 10 - 4,62 \cdot e^{-100t}}$ , А.

$$\underline{u_L(t) = L \frac{di}{dt} = 0,3 \cdot (-4,62) \cdot (-100) \cdot e^{-100t} = 138,6 \cdot e^{-100t}}, \text{ В.}$$

Для побудови графіка залежності  $\underline{i(t) = 10 - 4,62 \cdot e^{-100t}}$  визначимо сталу часу  $\tau_2 = \frac{1}{|p|} = 0,01 \text{ с} = 10 \text{ мс}$  і розрахуємо струм в декількох точках.

Таблиця 3.4 – Результати обчислень струму  $i(t)$

$t, \text{ мс}$	0	$0,25 \cdot \tau_2 = 2,5$	$0,5 \cdot \tau_2 = 5$	$0,75 \cdot \tau_2 = 7,5$	$\tau_2 = 10$
$i(t), \text{ А}$	5,38	6,4	7,2	7,82	8,3

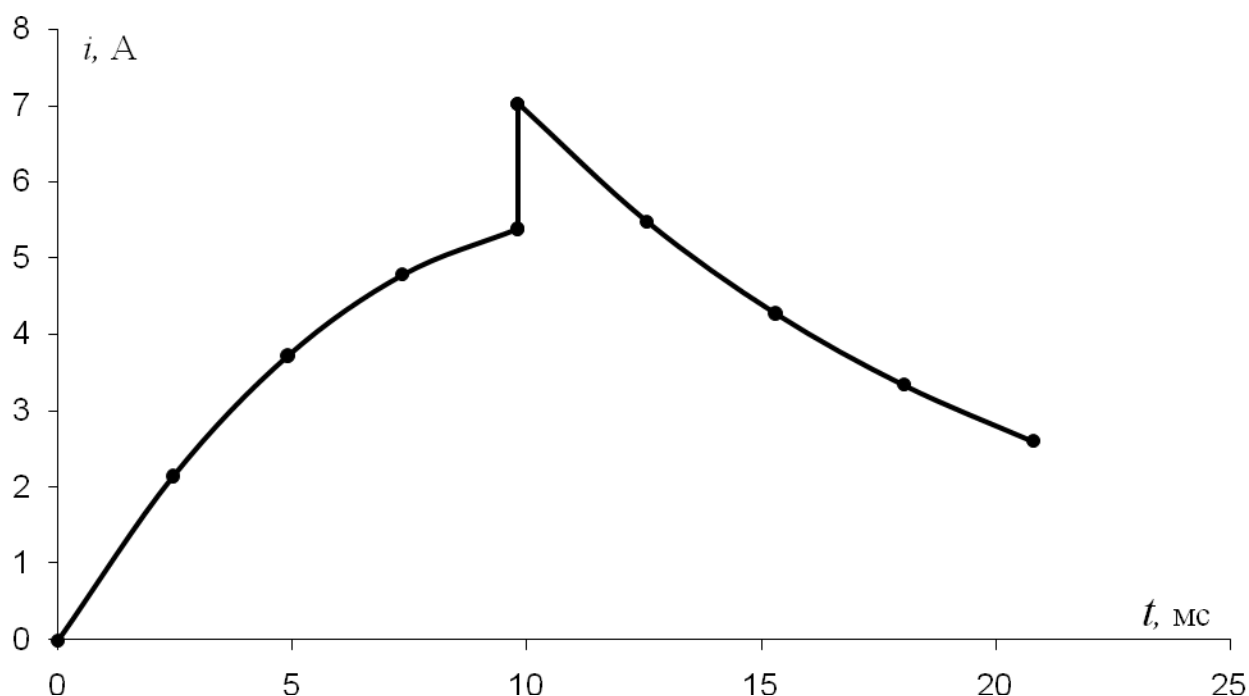


Рисунок 3.10 – Графік залежності  $i(t)$

### 3.5 Контрольні запитання до третьої частини РГР

1. Дайте визначення перехідних процесів
2. Сформулюйте закони комутації.
3. Дайте визначення класичного методу розрахунку перехідних процесів.
4. Дайте визначення примусових і вільних складових струмів і напруг; незалежних і залежних, нульових і ненульових початкових умов.
5. Поясніть, як скласти характеристичне рівняння за методом вхідного опору.
6. Поясніть, яким чином визначають сталі інтегрування у класичному методі.
7. Наведіть порядок розрахунку перехідних процесів класичним методом.



## 4 РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

### 4.1 Мета роботи

- засвоїти основні поняття теорії електричних кіл, що містять лінії з розподіленими параметрами;
- навчитися розраховувати вторинні параметри електричного кола (лінії) з розподіленими параметрами;
- вивчити методику визначення струму та напруги в будь-якій точці лінії з використанням рівнянь в гіперболічній формі.

### 4.2 Підготовка до роботи

4.2.1 З таблиці 4.1 за номером в журналі викладача вибрати вихідні дані для розрахунку.

4.2.2 Проробити теоретичний матеріал за темою роботи: [2] – с. 350–369, 492–509; [3] – с. 344–354.

### 4.3 Робоче завдання

Трифазна лінія передачі електроенергії довжиною  $l$  працює при лінійній напрузі  $U_{\text{л}}$  і частоті  $f$ . Відомі первинні параметри лінії:  $R_0$ ;  $L_0$ ;  $C_0$ , а також втрати на одну фазу  $P_0$  в ізоляції та на коронний розряд.

4.3.1. Визначити провідність  $G_0$  на одиницю довжини між проводами.

4.3.2 Визначити комплексний опір  $\underline{Z}_0$  і провідність  $\underline{Y}_0$  одиниці довжини.

4.3.3 Розрахувати вторинні параметри лінії – хвильовий опір, коефіцієнт розповсюдження, коефіцієнт загасання і фази.

4.3.4 Визначити довжину хвилі і фазову швидкість.

4.3.5 Знайти струм в кінці лінії, якщо відомо, що лінія живить активне навантаження потужністю  $P_2$  ( $\cos \varphi_2 = 1$ ).

4.3.6 Визначити напругу і струм на початку лінії за допомогою рівнянь в гіперболічній формі, якщо відома напруга в кінці лінії –  $U_2 = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}}$ .

4.3.7 Визначити зсув фаз між напругою на початку лінії і в кінці лінії.

4.3.8 Визначити активну потужність та ККД лінії.

Таблиця 4.1 – Вихідні дані для розрахунку

№	$l$ , км	$U_{\text{л}}$ , кВ	$R_0$ , Ом/км	$L_0$ , мГн/км	$C_0$ , нФ/км	$P_0$ , Вт/км	$P_2$ , МВт
1	900	400	0,06	1,23	9,2	2200	410
2	950	400	0,075	1,423	10,5	3000	420
3	1000	400	0,08	1,5	8,25	2500	430
4	1050	400	0,085	1,64	13,56	2700	1000
5	1100	400	0,11	1,7	9	2100	2000
6	1150	400	0,065	1,35	6,4	2500	380
7	1000	400	0,072	1,27	12,2	1500	450
8	550	400	0,102	1,26	8	2000	550
9	650	400	0,09	1,55	12	1800	660
10	750	400	0,105	1,4	11	1900	1700
11	850	400	0,089	1,23	8,4	2200	800
12	950	400	0,075	1,2	9	3050	560
13	410	400	0,12	1,3	10	2400	740
14	520	400	0,115	1,4	14,2	2350	830
15	640	400	0,14	1,5	12	2600	590
16	540	400	0,06	1,2	6	1500	310
17	380	400	0,07	1,3	7	1600	420
18	300	400	0,08	1,4	8	1700	530
19	250	400	0,09	1,5	9	1800	640
20	310	400	0,1	1,6	10	1900	750
21	520	400	0,11	1,7	11	2000	860
22	280	400	0,12	1,8	12	2100	970
23	400	400	0,13	1,7	13	2200	1080
24	330	400	0,14	1,4	14	2300	400
25	500	400	0,15	1,71	15	2400	1500
26	660	400	0,14	1,5	12	2600	590
27	560	400	0,06	1,2	6	1500	310
28	400	400	0,07	1,3	7	1600	420
29	330	400	0,08	1,4	8	1700	530
30	270	400	0,09	1,5	9	1800	640

#### 4.4 Формули для розрахунку

$$G_0 = \frac{P_0}{U_\phi^2} - \text{поперечна провідність};$$

$$\underline{Z}_0 = R_0 + j \cdot \omega \cdot L_0 - \text{комплексний опір одиниці довжини лінії};$$

$$\underline{Y}_0 = G_0 + j \cdot \omega \cdot C_0 - \text{комплексна провідність одиниці довжини лінії};$$

$$\underline{Z}_B = \sqrt{\frac{\underline{Z}_0}{\underline{Y}_0}} - \text{хвильовий опір};$$

$$\underline{\gamma} = \sqrt{\underline{Z}_0 \cdot \underline{Y}_0} = \alpha + j \cdot \beta - \text{коефіцієнт розповсюдження};$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} - \text{довжина хвилі};$$

$$v_\phi = \frac{\omega}{\beta} = \frac{\omega}{2\pi/\lambda} = \lambda \cdot f - \text{фазова швидкість};$$

$$\underline{I}_2 = I_2 = \frac{P_2}{3 \cdot U_{2\phi} \cdot \cos \varphi_2} - \text{струм наприкінці лінії};$$

$$sh(\underline{\gamma}l) = \frac{1}{2} \cdot (e^{\underline{\gamma}l} - e^{-\underline{\gamma}l}) - \text{гіперболічний синус};$$

$$ch(\underline{\gamma}l) = \frac{1}{2} \cdot (e^{\underline{\gamma}l} + e^{-\underline{\gamma}l}) - \text{гіперболічний синус};$$

$$\begin{cases} \underline{U} = \underline{U}_2 \cdot ch \underline{\gamma}y + \underline{I}_2 \cdot \underline{Z}_B \cdot sh \underline{\gamma}y \\ \underline{I} = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_B} \cdot sh \underline{\gamma}y + \underline{I}_2 \cdot ch \underline{\gamma}y \end{cases} - \begin{matrix} \text{формули для визначення напруги і струму} \\ \text{в будь-якій точці лінії в гіперболічній} \\ \text{формі при відомих напрузі і струмі напри-} \\ \text{кінці лінії}; \end{matrix}$$

$$P_1 = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 - \text{активна потужність};$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} - \text{ККД лінії}.$$

#### 4.5 Контрольні запитання до четвертої частини РГР

1. Дайте визначення електричного (магнітного) кола (лінії) з розподіленими параметрами та однорідної лінії з розподіленими параметрами.

2. Поясніть, що називають первинними та вторинними параметрами однорідної двопровідної лінії.

3. Здійсніть вивід диференціальних рівнянь однорідної двопровідної лінії.

4. Дайте визначення та охарактеризуйте параметри та характеристики усталеного режиму однорідної лінії.

5. Здійсніть вивід рівнянь в гіперболічній формі для визначення напруги та струму в будь-якій точці ліній при відомих напрузі та струмі на початку лінії (наприкінці лінії).

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Рибалко М. П. Теоретичні основи електротехніки. Лінійні електричні кола: підручник / М. П. Рибалко, В. О. Есауленко, В. І. Костенко. – Донецьк : Новий світ, 2003. – 513 с.
2. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи : Учебник / Л. А. Бессонов. – М. : Гардарики, 2002. – 640 с.
3. Основы теории цепей : Учеб. для вузов / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, Н. Н. Нетушил, П. И. Страхов. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
4. Воробкевіч А. Ю. Збірник задач з теоретичних основ електротехніки : навч. посібник / А. Ю. Воробкевіч, О. І. Шегедін. – Київ : Магнолія плюс, 2004. – ч. 1. 224 с.
5. Булашенко А. В. Теорія електричних та магнітних кіл.: навч. посібник / А. В. Булашенко. – Суми : Вид-во СумДУ, 2009. – 398 с.
6. Конспект лекцій з дисципліни «Теорія електричних та магнітних кіл» (для студентів усіх форм навчання спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології) / Я. Б. Форкун, М. Л. Глебова ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. – 56 с.
7. Основы теории кіл : Підручник для студентів вищих навчальних закладів / Ю. О. Коваль, Л. В. Гринченко, І. О. Милютченко, О. І. Рибін. – Харків : Компанія СМІТ, 2008. – 432 с.

*Виробничо-практичне видання*

Методичні рекомендації  
до виконання  
розрахунково-графічної роботи  
з дисципліни

## **«ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ТА МАГНІТНИХ КІЛ»**

*(для студентів усіх форм навчання спеціальності  
151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології)*

Укладачі: **ФОРКУН** Яна Борисівна,  
**ГЛЄБОВА** Марина Леонідівна

Відповідальний за випуск *Я. Б. Форкун*

За авторською редакцією

Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

План 2017 поз. 538 М

---

Підп. до друку 07.09.2017. Формат 60 x 84/16  
Друк на ризографі Ум. друк. арк. 2,6  
Тираж 50 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач:  
Харківський національний університет  
міського господарства імені О. М. Бекетова,  
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002  
Електронна адреса: rectorat@kname.edu.ua  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:  
ДК № 5328 11.04.2017.